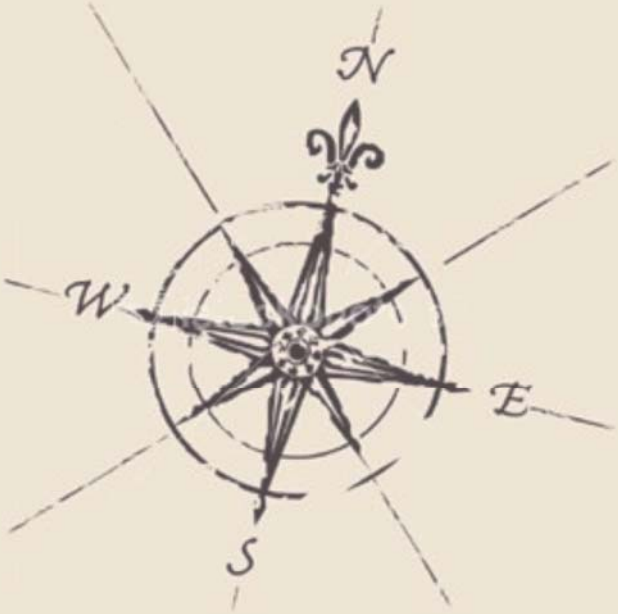
UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Matemáticas

TESIS DOCTORAL

PROCESOS DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS TÉCNICOS COMPLEJOS, EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE SU CICLO DE VIDA



Antonio Luis Álamo Trujillo

Las Palmas de Gran Canaria, mayo de 2014

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA
Departamento de Matemáticas

JUAN ROCHA MARTÍN, SECRETARIO DEL DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA

CERTIFICA:

Que el Consejo de Departamento celebrado el día 5 de mayo de 2014 tomó el acuerdo de dar la conformidad para su tramitación, a la tesis doctoral titulada ***"Procesos de decisión para el diseño óptimo de sistemas técnicos complejos, el control y la gestión dinámica de su ciclo de vida"***, presentada por el doctorando D. Antonio Luis Álamo Trujillo y dirigida por el Doctor D. Blas José Galván González.

Y para que así conste y a efectos de lo previsto en el Reglamento para la elaboración, tribunal, defensa y evaluación de Tesis Doctorales de esta Universidad, se expide el presente certificado en Las Palmas de Gran Canaria a cinco de mayo de dos mil catorce.

t +34 928 458 800
f +34 928 458 811
secretaria@dma.ulpgc.es
www.ulpgc.es
Edificio de Informática y Matemáticas
Campus U. de Tafira
35017 Las Palmas de Gran Canaria

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
DPTO. DE MATEMÁTICAS

PROGRAMA DE DOCTORADO:
MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS EN LA INGENIERÍA
(BIENIO 1993 – 1995)

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

TESIS DOCTORAL

"PROCESOS DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS TÉCNICOS COMPLEJOS, EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE SU CICLO DE VIDA"

D. Antonio Luis Álamo Trujillo

Dirección: Dr. D. Blas José Galván González

El Director **El Doctorando**

Las Palmas de Gran Canaria, mayo de 2014

PROCESOS DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE SISTEMAS TÉCNICOS COMPLEJOS, EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE SU CICLO DE VIDA

AGRADECIMIENTOS

Mí agradecimiento muy especial, por su valiosa ayuda y orientación, a mí director de Tesis, D. Blas J. Galván González, quien me dio la oportunidad de realización de esta Tesis Doctoral y me introdujo en el mundo de la fiabilidad y la gestión del mantenimiento.

A aquellos amigos, compañeros y colaboradores, cuya ayuda y apoyo ha hecho posible la publicación de la presente obra.

A la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, y en especial, al Departa - mento de Matemáticas y su director, agradecer su desinteresado apoyo en todo momento.

También reconocer mi más sincero agradecimiento, por su paciencia, apoyo y comprensión, a mí esposa, Laura, y mis hijos, Adriana A. y Antonio J..

DEDICATORIA

A mí padre, cuya ilusión por ver culminado este trabajo me dio las fuerzas y el ánimo necesarios para ello.

A mí madre, mí esposa Laura, mis hijos Adriana A. y Antonio J., en justa correspondencia a las innumerables horas, amablemente cedidas, para la culminación de esta tesis.

INDICE GENERAL

RESUMEN…….. 1

INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA……... 5

1. ANTECEDENTES……. 5

1.1. Diagnóstico del estado del mantenimiento industrial en España…… 5

1.1.- 0. Material y métodos…….. 5

1.1.- 1. Resultados……... 6

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS……... 13

3. METODOLOGÍA……... 20

4. ESTRUCTURA DE LA TESIS……. 22

5. CONTRIBUCIONES……. 26

6. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS……... 30

CAPÍTULO I: REVISIÓN DEL ESTADO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL……. 33

1. REVISIÓN DEL ESTADO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. ESTADO DEL ARTE. …… 33

1.1. La evolución en el tiempo del mantenimiento……..... 33

1.2. Tendencias de futuro. Cambios organizativos y tecnológicos…… 34

1.3. Estado del arte. Revisión de la literatura…… 35

2. ASPECTOS VINCULADOS A LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. LA GESTIÓN DE OPERACIONES EN UN ENTORNO INDUSTRIAL…… 51

2.1. La Gestión del Mantenimiento como función de negocio…….. 51

2.1.-1. *La importancia del mantenimiento como generador de beneficio*…….. 51

2.1.-2. *Aspectos relacionados con el proceso de toma de decisiones y el plan estratégico*……. 52

2.1.-2.1. *Uso de técnicas de Gestión: OR/MS*…… 52

2.1.-2.2. *Reducción de costes indirectos: el beneficio oculto del mantenimiento*……... 53

2.1.-2.2.1. *Costes asociados al Mantenimiento. Clasificación*…… 54

2.1.-2.3. *La Gestión del Mantenimiento en un entorno competitivo*…… 57

2.1.-2.3.1. *El binomio del mantenimiento. El mantenimiento como función gerencial y técnica* ……..... 58

2.1.-2.3.2. *Mantenimiento y competitividad: ¿Qué mantenimiento debe realizarse?*..... 62

(a) Modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado…… 63

(b) Estrategias y políticas de Mantenimiento. Tendencias…… 66

2.1.- 2.4. *La organización en mantenimiento*..... 75

(a). *Estructura organizativa*

(b). *Planificación y programación de trabajos. Beneficios derivados.*

(c). *Materiales y repuestos.*

(d). *Organización del trabajo.*

(e). *Sistemas de información.*

2.2. Marco de referencia para el diseño del sistema de gestión del mantenimiento…... 79

2.2.-1. *Aspectos relacionados con el diseño del sistema OM/MM*……... 80

2.2.-1.1. *Tipo de industria*……. 80

2.2.-1.2. *Tipo de organización*……. 81

2.2.-1.3. *Filosofía de gestión*…… 82

2.2.-1.4. *Sistema de control de la producción: Interacción mantenimiento*

– control de la producción…… 84
2.2.-2. *Toma de decisiones en Mantenimiento. Niveles de decisión*…… 85
2.2.-3. *Herramientas de gestión disponibles para la toma de decisiones en mantenimiento*…….... 88
2.2.-3.1. *Kit de herramientas para el directivo*…… 88
2.2.-3.2. *Sistema de Información para la Gestión del Mantenimiento*…….. 90

3. CONTRIBUCIONES. Principales factores para la estructuración y diseño de los modelos.. 92

CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN DE LA O&M DE SISTEMAS TÉCNICOS……. 105

1. MODELO DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRATEGIA Y EL PROGRAMA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. NUEVO MODELO GENERAL DE MANTENIMIEN -TO PARA EL ASEGURAMIENTO DEL ESTADO……... 105

2. MARCO DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN DE LA O&M……. 111
2.1. Dimensión salida (Output): Eficiencia, efectividad y productividad…… 112
2.2. Dimensión riesgo: Pérdidas externas y pérdidas técnicas……..... 116
2.3. Dimensión Recursos. Disponibilidad vs. gasto en mantenimiento…….. 118
2.4. Bases del modelo para la planificación y control de la O&M. Gestión dinámica del ciclo de vida de la STM+C seleccionada……... 121

3. MODELO DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS DE DECISIÓN……... 122

CAPÍTULO III: PROCESO DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALTERNATIVAS STM+C. METODOLOGÍA I + I + D……... 127

1. INTRODUCCIÓN…….. 127

2. PROCESO DE DECISIÓN MULTIETAPA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE LA STM+C Y SU GAMA DE ALTERNATIVAS (NIVEL 1). METODOLOGÍA I + I + D…….... 129
2.0. Entorno metodológico. Ingeniería de sistemas…… 129
2.1. Integración RAMS + LCC en el proceso de diseño. Modelos conceptuales……. 137
2.2. Observaciones generales. Hipótesis básicas……. 138
2.3. Fases del modelo…….. 139

3. CONTRIBUCIONES……. 165

CAPÍTULO IV: PROCESO DE DECISIÓN Y PLATAFORMA CIENTÍFICO – TÉCNICA PARA EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE LA O&M…… 169

1. INTRODUCCIÓN…….. 169

2. MARCO DE REFERENCIA PARA LA DEFINICIÓN Y DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN…… 169
2.1. La Gestión de activos en un entorno competitivo. Principios básicos…… 169
2.2. El mantenimiento y la gestión del ciclo de vida. El binomio de la función mantenimiento…….. 170
(a) El mantenimiento como función gerencial. Rentabilidad del mantenimiento……... 170
(b) El mantenimiento como función técnica. Eficacia y eficiencia del mantenimiento. Orientación de las acciones…….. 172
2.3. Efectividad total…… 173
2.4. Sistema complejo. Emergencia. Propiedades emergentes…… 175
2.5. Integración del mantenimiento en los objetivos del negocio…….. 179

3. DEFINICIÓN DE LA PLATAFORMA CIENTÍFICO - TÉCNICA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN…… 180
3.1. Proceso de decisión para el control y la gestión dinámica del ciclo de vida del

sistema global. Fases del modelo propuesto…… 183
3.2. Descripción conceptual de la Estructura del Sistema Global……... 188
3.2.-1. *Sistema de Información para la Gestión y control. Informes de funcionamiento*……... 188
3.2.-2. *Definición de funciones y arquitectura modular de la estructura técnica de control*…… 198

4. CONTRIBUCIONES……. 201

CAPÍTULO V: APLICACIONES…….. 207

Caso 1: Proyecto de autopista de nuevo trazado en régimen de explotación indirecta. Diseño, configuración y selección de la STM+C del "subsistema firme y pavimentación"…….. 209
Caso 2: Contrato de Mantenimiento y Otorgamiento de Garantías de "Proyecto para suministro, ejecución y explotación de un parque eólico". Proceso de decisión para la mejora de la eficiencia del diseño y la selección de la STM+C……... 243
Caso 3: Proyecto de infraestructura para la ejecución de una pista de aterrizaje y dique de abrigo. Proceso de decisión multietapa para el diseño óptimo y selección de la STM+C del "subsistema central hormigonera"……... 289

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN…… 331

BIBLIOGRAFÍA…….. 337

GLOSARIO DE TÉRMINOS……. 361

ANEXO I .EL BENCHMARKING COMO PROCESO DE GESTIÓN…… 375

ANEXO II. GUÍA BÁSICA DEL EQUIPO DE GESTIÓN. DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES PARA EL ÉXITO EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA……. 379

ANEXO III. GUÍA BÁSICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN MANTENIMIENTO. …….. 387

1. MANTENIMIENTO VS. GESTIÓN DE RIESGOS. MARCO PARA LA DEFINICIÓN Y DISEÑO ÓPTIMO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO, DETERMINACIÓN DEL COSTE DE MANTENIMIENTO Y EL RDC……... 387
1.1. Riesgo de mantenimiento. Definición .Cálculo de RDC…….. 387
1.2. Modos de reducción del riesgo. Base para la determinación del coste del mantenimiento y el RDC…….. 388

2. ANÁLISIS DE RIESGO…… 391
2.1. PRA (Probabilistic Risk Assessment)…….. 392
2.2. Determinación del RPN-teórico……... 393

3. COSTE DEL DOWNTIME……... 394
3.1. Factores de costes relacionados con el mantenimiento. Costes directos e indirectos del mantenimiento……... 395
3.1.-1. *Definiciones*…… 395
3.1.-2. *Optimización de los costes de mantenimiento. Marco general*…… 396
3.2. Determinación del coste del downtime. Aspectos a considerar en la fase de diseño……... 399

4. MODELO PARA LA MAXIMIZACIÓN DEL ROI_M BAJO RESTRICCIONES ECONÓMICAS, DE TIEMPO Y/O RIESGO TOLERABLE……... 400
4.1. Proceso para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento……. 401

ANEXO IV. COSTE DEL CICLO DE VIDA. MÉTODOS BÁSICOS Y REFERENCIAS……..... 413

1. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES…….. 414

2. ESTRUCTURA BÁSICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL LCC: FASES DEL ANÁLISIS Y TIMING……... 416

3. RELACIÓN MANTENIMIENTO – LCC……... 437

ANEXO V. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y TAREAS BÁSICAS PARA EL DESARROLLO DE LA PLATAFORMA CIENTÍFICO - TÉCNICA DEL SISTEMA AVANZADO DE PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO…….. 441

ANEXO VI. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS…….. 457

INDICE DE TABLAS

- Tabla 1: Clasificación de artículos por áreas de investigación……... 36
- Tabla 2. Clasificación de artículos por subáreas “A1: Modelos de optimización”…… 37
- Tabla 3. Clasificación de artículos por subáreas “A2: Técnicas de mantenimiento”……. 38
- Tabla 4. Clasificación de artículos por subáreas “A3: Programación del mantenimiento”…… 40
- Tabla 5: Programación del mantenimiento. Principales conclusiones del trabajo de Pintelon, L.(1990)…….. 41
- Tabla 6. Clasificación de artículos por subáreas “A4: Medidas del Desempeño”…….. 44
- Tabla 7: Resumen bibliografía…… 44
- Tabla 8. Clasificación de artículos por subáreas “A5: Sistema de Información del mantenimiento”……... 49
- Tabla 9. Clasificación de artículos por subáreas “A6: Políticas del mantenimiento”…… 51
- Tabla 10: Matriz de comparación de herramientas MRS……... 75
- Tabla 11: Subdivisión de las pérdidas externas sobre las bases de la Teoría general. Matriz de decisión…….. 117
- Tabla 12: Matriz de análisis de criticidad……... 149
- Tabla 13: Tabla tipo para el análisis y diseño de un subsistema…… 160
- Tabla 14: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un sistema……... 160
- Tabla 15: Tabla tipo para el análisis de escalabilidad: ordenación y priorización de alternativas…….. 161
- Tabla 16: Efectos de las características superficiales sobre las cualidades funcionales de los firmes…….. 217
- Tabla 17: Coste neto teniendo en cuenta operación de mantenimiento…….. 221
- Tabla 18: Ruido medido en diferentes tipos de pavimento……. 227
- Tabla 19: Alternativas de pavimentos a evaluar……. 230
- Tabla 20: Trade-off requerimientos…… 237
- Tabla 21: Subdivisión de las pérdidas externas en base a la teoría general…… 255
- Tabla 22: Matriz de análisis del riesgo de un item o función……. 263
- Tabla 23: Tabla tipo para el análisis y diseño de un subsistema…… 273
- Tabla 24: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un sistema……... 273
- Tabla 25: Tabla tipo para el análisis de escalabilidad: ordenación y priorización de alternativas…….. 273
- Tabla 26: Tabla tipo para el análisis y diseño de un paquete de mantenimiento…… 281
- Tabla 27: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento……... 281
- Tabla 28: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento: Combinación de diferentes paquetes alternativos de mantenimiento…… 283
- Tabla 29: Fórmula para la fabricación del hormigón…….. 293
- Tabla 30: Consumo total estimado de hormigón fases 1 y 2…….. 296
- Tabla 31: Estimación producción diaria de hormigón fases 1 y 2……. 297
- Tabla 32: Estimación de los tiempos de producción teórico y disponibles fases 1 y 2…… 297
- Tabla 33: Configuración básica y alternativas…… 302
- Tabla 34: Fallos probables para cada alternativa (sin opciones de mejora de preventivo)…… 304
- Tabla 35: Características de mantenimiento de cada alternativa. Estimación del Re*DC*…… 306
- Tabla 36: Coste opciones para cada alternativa. Efecto sobre el comportamiento al fallo…… 307
- Tabla 37: Estimación del coste m^3 de hormigón (€/m^3)……. 309
- Tabla 38: Estimación del factor de penalización por fase y compensación downtime planificado, para cada alternativa……... 309
- Tabla 39: Factor de penalización y compensación downtime no planificado, para cada alternativa. Estimación del RDC (con y sin opciones)……... 310
- Tabla 40: Reducción de los tiempos programados y efecto sobre los intereses del crédito promotor. Estimación de las bonificaciones para cada alternativa en la fase 1……. 310
- Tabla 41: Recursos necesarios para el desmantelamiento del subsistema…….. 313
- Tabla 42. Etapa 1: Selección central hormigonera en base al desempeño y CAPEX…… 314

- Tabla 43. Etapa 2: Selección central en base al desempeño, CAPEX y OPEX $_{básico}$. No se consideran compensaciones…… 315
- Tabla 44. Etapa 3.1: Selección central en base al desempeño, CAPEX y OPEX (Se incorporan compensaciones negativas)……... 317
- Tabla 45. Etapa 3.2: Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX y penalizaciones. Se incorporan compensaciones positivas…… 319
- Tabla 46. Recompra y/o desmontaje. Valores negociados para cada alternativa…… 320
- Tabla 47. Etapa 4: Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX, compensación negativa y positiva. Se incorpora recompra o desmantelamiento……... 321
- Tabla 48. Etapa 5: Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX, compensación negativa y positiva y recompra o desmantelamiento. Se incorporan Opciones preventivo/predictivo: (A) + (B) + (C)……... 323
- Tabla 49: Resumen Proceso de decisión multietapa. Evolución del R-LCC para cada alternativa…… 324
- Tabla 50: Tabla tipo para el análisis y diseño de un paquete de mantenimiento…… 405
- Tabla 51: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento……... 405
- Tabla 52. Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento: Combinación de diferentes paquetes alternativos de mantenimiento…… 408
- Tabla 53: Características de los métodos de análisis de la disponibilidad de un sistema…….. 424

INDICE DE FIGURAS

- Figura 1: Información sobre el perfil de la muestra…… 6
- Figura 2: Número de empresas que cuentan con y utilizan un GMAO…… 7
- Figura 3: Detalles del grado de sistematización de las decisiones tomadas con criterios económicos……. 8
- Figura 4: Grado de conocimiento de herramientas orientadas a la optimización del mantenimiento con respecto a criterios económicos…….. 9
- Figura 5: Grado de conocimiento de herramientas parciales (válidas únicamente para ciertas actividades de mantenimiento) orientadas a la optimización del mantenimiento con respecto a criterios económicos……. 9
- Figura 6: Interés en la implantación de una herramienta orientada a la optimización del mantenimiento con criterios económicos…… 10
- Figura 7: Gestión del mantenimiento correctivo…… 11
- Figura 8: Gestión del mantenimiento preventivo y mejoras……... 12
- Figura 9: Objetivos y contribuciones básicas de la tesis doctoral……. 19
- Figura 10: Ejes para el análisis de los procesos de decisión para el diseño de la STM+C y la gestión dinámica de su ciclo de vida……... 20
- Figura 11: Estructura de la tesis Doctoral……... 25
- Figura 12: La gestión del MTTO. Perspectiva en el tiempo……... 33
- Figura 13: Desde el enfoque tradicional hacia las nuevas políticas en Mantenimiento – Producción…….. 35
- Figura 14: Interrelación mantenimiento-producción. Base para la programación del mantenimiento……. 39
- Figura 15: Distribución artículos científicos por Campos Temáticos…… 46
- Figura 16: Distribución artículos científicos por Áreas de Aplicación……... 47
- Figura 17: Distribución artículos científicos por Unidad de Análisis…… 47
- Figura 18: Comportamiento del precio en ambos tipos de mercado…….. 53
- Figura 19: Los costes del mantenimiento……... 54
- Figura 20: Iceberg de costes en mantenimiento…….. 56
- Figura 21: Relación Intensidad de capital & demanda de mantenimiento……. 56
- Figura 22: Mantenimiento y ciclo económico…… 57
- Figura 23: El bucle de la gestión del mantenimiento…….. 58
- Figura 24: Principios para la definición del presupuesto operativo…… 61
- Figura 25: Participación del Mantenimiento en la definición del presupuesto operativo…… 61
- Figura 26: Distribución CM-PM (Con buffer de reserva). Efecto coste mantenimiento sobre coste de downtime……... 64
- Figura 27: Distribución CM-PM (Sin buffer de reserva). Efecto coste mantenimiento sobre coste de downtime……... 65
- Figura 28: Modelo terotecnología……... 65
- Figura 29: Esquema simplificado del Modelo EUT…… 66
- Figura 30: Curva de la bañera……. 68
- Figura 31: Matriz de criticidad……... 70
- Figura 32: Proceso de gestión del riesgo…… 74
- Figura 33: Resumen de inputs-outputs…… 74
- Figura 34: Forma de entender la relación entre Mantenimiento y Fabricación……. 79
- Figura 35: Esquema conceptual para la Gestión del Mantenimiento…… 79

- Figura 36: El mantenimiento en el contexto de la gestión de operaciones……. 80
- Figura 37: Interacción Mantenimiento-Producción…… 84
- Figura 38: Comparación de los costes de mantenimiento para la planificación CM-PM…….. 86
- Figura 39: Hacia un nuevo modelo general del mantenimiento……. 106
- Figura 40: Concepto del LCC……. 107
- Figura 41: Enfoque para la búsqueda del Óptimo global……... 107
- Figura 42: Orden de implementación……. 108
- Figura 43. Nivel 2: Conceptos básicos y sus elementos……. 110
- Figura 44: Diseño orientado hacia el Ciclo de Vida……... 111
- Figura 45: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M……... 112
- Figura 46: Marco de referencia para el diseño de los procesos de decisión en los niveles 1 y 2……... 115
- Figura 47: Evolución del conocimiento y la facilidad de cambio…….. 115
- Figura 48: Matriz de evaluación de las pérdidas de un sistema y su efecto sobre los tiempos de producción…….. 116
- Figura 49: Influencia de las Especificaciones Técnicas y la planificación de la O&M (STM) sobre la disponibilidad y la rentabilidad económica de un sistema…… 118
- Figura 50: Ingeniería orientada al ciclo de vida (Ingeniería concurrente)…….. 121
- Figura 51: Sistema Conceptual para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida…… 122
- Figura 52: El iceberg de costes de un activo/sistema a lo largo de su ciclo de vida……... 127
- Figura 53: Beneficio de la detección temprana de problemas. La rentabilidad económica de la eficiencia……. 128
- Figura 54: Ingeniería de Sistema de Procesos…… 135
- Figura 55: Árbol de actividades de la Ingeniería de Sistema de Gestión……... 135
- Figura 56: V- Model en Proceso de Ingeniería de Sistemas……... 136
- Figura 57: Proceso de Decisión para el diseño STM+C. “Metodología I+ I+ D” de toma de decisiones multietapa. Trade-off basado sobre las componentes de valor (KPIs) y coste total (LCC-dynamic)……..... 141
- Figura 58: Esquema conceptual para la definición por comparación homogénea del plan de mejora propio en base a restricciones…… 143
- Figura 59: Estructura básica de las etapas para el diseño STM+C…… 144
- Figura 60: Definición equilibrada de la STM……. 145
- Figura 61: Esquemas para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones al diseño……... 148
- Figura 62: Mapa Conceptual del modelo “LCC-dinámico” (Nivel 1)…… 154
- Figura 63: Técnicas semicuantitativas básicas del modelo (Nivel 1)……. 154
- Figura 64: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo……... 155
- Figura 65: Marco conceptual para el análisis de escalabilidad. Evaluación y priorización de las STM(i)……... 159
- Figura 66: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar la mejor STM en base a los grados de libertad del sistema……. 161
- Figura 67: Esquema conceptual para el análisis a nivel de componente…… 162
- Figure 68: Cuatro alternativas de vía para el tren de alta velocidad HSL-Zuid. Composición del LCC…….. 162
- Figura 69: Infraestructura de apoyo…… 163

- Figura 70: Bases para el despliegue…… 163
- Figura 71: Operativa de implantación. Puesta en marcha de la STM+C…… 164
- Figure 72: Efectos de las compensaciones (bonus y penaltis) sobre el menor LCC vs. proceso decisión…….. 166
- Figura 73: Las dos vías de generar beneficio……. 170
- Figura 74: Árbol conceptual para evaluar el papel del mantenimiento en la rentabilidad……. 172
- Figura 75: Resultado del efecto multiplicador del aumento simultáneo de la eficiencia interna y externa…….. 173
- Figura 76: Ejes de actuación para mejorar la Efectividad Total……. 174
- Figura 77: El mantenimiento como palanca de la Efectividad Total…….. 175
- Figura 78: Componentes del plan director propuesto para el desarrollo de la plataforma científico – técnica…….. 179
- Figura 79: Interacción Mantenimiento - Producción (O&M) – Mercado (&M_1). El puzzle de la competitividad…….. 181
- Figura 80: Diagrama sinóptico para el desarrollo de la plataforma científico-técnica del Sistema Global…… 182
- Figura 81: Esquema conceptual del proceso de decisión del Sistema de Información. Marco de referencia para la "Homeostasis Artificial del Sistema". Método faro…… 183
- Figura 82: Aprendizaje evolutivo para la mejora de la STM+C……. 185
- Figura 83: Infraestructura de apoyo…… 186
- Figura 84: Bases para el despliegue…… 186
- Figura 85: Operativa de implantación……. 187
- Figura 86: Definición equilibrada de la estructura organizativa y funcional…….. 187
- Figura 87: Diagrama de flujo de la información. Estructura de la red de informes…… 194
- Figura 88: Ilustración de la relación funcional entre el P.C. y los I.D.: Control del mantenimiento……. 195
- Figura 89: Estructura del Sistema Global…….. 200
- Figura 90: Áreas de actuación propuestas para el desarrollo de la plataforma científico - técnica del sistema avanzado de planificación del mantenimiento…… 201
- Figura 91: Firmes flexibles (base granular)…… 215
- Figura 92: Firmes semirígidos (base tratada con ligantes hidraúlicos)…… 216
- Figura 93: Firmes rígidos…… 216
- Figura 94: Ámbitos de la sostenibilidad……. 220
- Figura 95: Evolución de precios de betún y cemento (oscilaciones del betún frente a la estabilidad del hormigón)…….. 222
- Figura 96: Comparación del ciclo de vida entre soluciones rígidas y flexibles de pavimentos equivalentes en términos funcionales……. 223
- Figura 97: Radiación emitida a la atmósfera por hormigón, asfalto y suelo desprotegido……. 223
- Figura 98: Energía total consumida para construir, mantener y rehabilitar diferentes tipos de pavimento…… 224
- Figura 99. Evolución del: a) índice de confort de conducción y del b) índice de perfil de conducción…….. 226
- Figura 100: Diferentes estrategias de conservación de un firme: esquema usual……... 231
- Figura 101: Ocurrencia del modo de fallo 1(raveling) en % / año sobre mezcla de asfalto ZOAB…….. 232
- Figura 102: Análisis del coste total de las alternativas……... 238
- Figura 103: Efecto de los bonus y penalizaciones sobre el intervalo de LCC mínimo vs.

proceso de decisión……. 239
- Figura 104: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo……... 246
- Figura 105: Esquema conceptual para la definición por comparación homogénea del plan de mejora propio en base a restricciones…… 250
- Figura 106: Esquema energético de un parque eólico. Mapa conceptual para el diseño y la planificación de la O&M…… 253
- Figura 107: Matriz de evaluación de los tiempos de producción…… 254
- Figura 108: Disponibilidad y beneficio: el papel de las Especificaciones Técnicas y la planificación de la O&M…… 257
- Figura 109: Ingeniería orientada al ciclo de vida (Ingeniería concurrente)…… 258
- Figura 110: Sistema Conceptual para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida…… 259
- Figura 111: Marco de referencia para el diseño de los procesos de decisión en los niveles 1 y 2……... 260
- Figura 112: Esquemas para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones al diseño……... 262
- Figura 113: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M. Método de "Óptimos anidados"…… 267
- Figura 114: Marco conceptual para el análisis de escalabilidad. Evaluación y priorización de las STM(i) …….. 271
- Figura 115: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar la mejor STM en base a los grados de libertad del sistema……. 274
- Figura 116: Árbol conceptual para evaluar la relación mantenimiento-productividad - rentabilidad……. 275
- Figura 117: Hacia un nuevo modelo general del mantenimiento…… 276
- Figura 118: Marco conceptual para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento……. 277
- Figura 119: Marco conceptual para la evaluación y priorización bajo restricciones económicas, temporales y de riesgo de las tareas de mantenimiento……... 282
- Figura 120: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema……. 283
- Figura 121: Esquema conceptual para el análisis a nivel de componente…….. 284
- Figura 122: Infraestructura de apoyo…… 285
- Figura 123: Bases para el despliegue…….. 285
- Figura 124: Operativa de implantación. Puesta en marcha de la STM+C…… 285
- Figura 125: Plano básico de emplazamiento y distribución…… 289
- Figura 126: Beneficio de la detección temprana de problemas. La rentabilidad económica de la eficiencia……. 290
- Figura 127: Sistema Conceptual para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida…… 291
- Figura 128: Diseño base de la central hormigonera…… 300
- Figura 129: Árbol Costes de Adquisición. Estudio del CAPEX…… 312
- Figura 130: Árbol Costes de Sostenimiento/funcionamiento. Estudio del OPEX…….. 312
- Figura 131: Árbol Costes desmantelamiento y traspaso/venta……... 313
- Figura 132: Detalles gráficos para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y CAPEX…….. 315
- Figura 133: Detalles gráficos para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño, CAPEX y OPEX $_{básico}$…... 316

- Figura 134: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX .Se consideran las penalizaciones…… 318
- Figura 135: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. Se consideran las bonificaciones…… 320
- Figura 136: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. Se considera recompra o desmantelamiento…… 321
- Figura 137: Detalles gráficos para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. Se considera opciones preventivo/ predictivo…… 324
- Figura 138: El camino del Proceso de decisión multietapa. Comparación y análisis relativo de alter nativas en base al R-LCC…….. 325
- Figura 139: Perfil de riesgo……. 387
- Figura 140: Dirección de crecimiento del riesgo…… 388
- Figura 141: Riesgo medio…….. 388
- Figura 142: Direcciones de actuación para la reducción del riesgo…… 389
- Figura 143: Ciclo de Mantenimiento (esquema simplificado)……... 389
- Figura 144: Orden de implementación de las áreas principales del ciclo de mantenimiento…. 390
- Figura 145: Marco conceptual para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento……. 402
- Figura 146: Marco conceptual para la evaluación y priorización bajo restricciones económicas, temporales y de riesgo de las tareas de mantenimiento……. 407
- Figura 147: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema……. 408
- Figura 148: Efectos de la fase de adquisición (etapa de diseño) sobre las fases de operación y mantenimiento……. 413
- Figura 149: Ciclo de vida de un activo físico……. 414
- Figura 150: Punto de rentabilidad técnica…….. 415
- Figura 151: El objetivo del análisis LCC es la determinación del coste total (costes de adquisición y propiedad) de un activo /producto/sistema a través de su ciclo total de vida…... 416
- Figura 152: Técnicas semicuantitativas básicas para el análisis LCC…… 416
- Figura 153: Fases básicas del análisis LCC de un sistema……. 417
- Figura 154: Concepto de elemento de coste……... 419
- Figura 155: Ejemplo de diagrama de Árbol Costes de Adquisición……... 420
- Figura 156: Ejemplo diagrama de Árbol Costes de Sostenimiento/funcionamiento…….. 420
- Figura 157: Ejemplo Diagrama de Árbol Costes desmantelamiento y traspaso/venta…….. 421
- Figura 158: Medidas para la gestión de la Regularidad…….. 426
- Figura 159: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo……... 429
- Figura 160: Comparación de la efectividad de sistemas……. 432
- Figura 161: Gráfico de Pareto para la comparación de los costes de un sistema de bomba simple o doble (bomba en standby)…… 433
- Figura 162: Proceso de decisión y AEMOs según Salazar et al., 2005…….. 434
- Figura 163: Ejemplo de la relación entre el perfil de costes proyectados - gastos realizados – incertidumbre sobre el LCC…… 436

- Figura 164: Esquema modular general del S.I. para el mantenimiento…….. 443

RESUMEN

Las posibilidades de futuro de toda empresa que fundamente su negocio en la productividad de los activos físicos pasa ineludiblemente por el filtro de la competitividad, y por tanto, del beneficio. Para la mejora de la competitividad de los sistemas técnicos es necesario dar una respuesta integrada en los tres niveles que la garantizan:

1.- En el nivel inicial de inversión, con exigencias de diseño, construcción y montaje.

2.- En los costes operativos, a través de la selección de estrategias y políticas de O&M (Operación y Mantenimiento) apropiadas.

3.- A nivel de facturación, según la capacidad que presente continuamente para garantizar la demanda asociada a los ciclos de mercado y los ingresos netos.

El alto nivel de competitividad impuesto por las dinámicas y complejidad de los mercados actuales exige una elevada capacidad de respuesta (homeostasis). Sin embargo, las compañías afrontan severas dificultades a la hora de diseñar, rediseñar o restructurar sus plantas productivas.

En este contexto, la toma de decisiones, en la fase de adquisición, es extremada - mente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos en un entorno complejo y de alta competitividad como el actual.

El analista, tanto en la Fase Inicial (Nivel 1: Fase de Inversión), como en la posterior (Nivel 2: Fase de Utilización), ha de tratar con un problema MCDM (*Multiple criteria decision – making)* complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones, y con objetivos normalmente en conflicto.

En este trabajo de tesis **se definen y diseñan, para dar apoyo a los procesos de decisión en la Fase de inversión y de Utilización,** unos modelos de decisión centra - dos en dos ejes básicos:

1. La ***mejora de la eficiencia***, a través del diseño con rigor de Soluciones Técnicas y de O&M Coste - efectivas (STM+C).
2. La ***mejora de la efectividad y productividad real neta,*** a través del Control y la Gestión dinámica de la configuración.

Para la *Fase de inversión (nivel 1)* se desarrolla un *Proceso de decisión multietapa para el diseño óptimo de la STM+C* (Soluciones Técnicas y de Operación & Mantenimiento Coste-efectivas) *y su gama de alternativas*.

El principal objetivo, a este nivel, es brindar al analista una herramienta con dos utilidades básicas:

- investigar, comparar, innovar y diseñar configuraciones : obtener alternativas STM+C y sus gamas;
- seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y la componente de coste total, para el ciclo de vida considerado.

El proceso de decisión es iterativo y suministra una definición gradual top-down de los detalles del diseño en base al interés y objetivos del cliente. El resultado es un informe muy detallado de las alternativas STM+C en el que se recogen aspectos técnicos, de O&M y costes.

Para la *Fase de Utilización (nivel 2)* se define y diseña un *Sistema de información para la Gestión del ciclo de vida del sistema global,* a la vez, que el proceso de decisión y la plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.

El objetivo principal es brindar la posibilidad de realizar una gestión científica, tanto a nivel estratégico, como táctico, y operativo, que permita el “reemplazo” de

decisiones soportadas por criterios subjetivos por decisiones objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos, tales como análisis de sistema y la construcción de modelos matemáticos.

Se propone una *Estructura de Control Dinámica* de apoyo a la toma de decisiones que permita la coevolución de los índices de desempeño (IP´s, por sus siglas en inglés) del sistema con los cambios asociados a factores tanto internos como externos.

Entre las ventajas del modelo cabe destacar:

- Su aplicación en la planificación, con un enfoque estratégico e integral, de la explotación y mantenimiento de equipos.
- Dar soporte a la toma de decisiones y, en su caso, optimizar la explotación de equipos bajo criterios de fiabilidad, disponibilidad, seguridad pública y medioambiental, costes del ciclo de vida y criterios de explotación, y plan de negocio de la empresa.
- Reducir los niveles de incertidumbre.
- Aumentar la confiabilidad del sistema y reducir los riesgos asociados a la operación.

Un campo actual de aplicación de la metodología desarrollada en este trabajo de tesis son los nuevos "contratos integrados", tales como: D&C (Design & Construct), DBM (Design & Built & Maintain) y DBFM (Design, Build, Finance and Maintain), donde el contratista asume responsabilidades, no sólo de proyecto, sino también de construcción, mantenimiento y financiación.

Se analizan tres casos reales de contratos integrados, que por su tipología, resultan idóneos para proveer una descripción detallada sobre la implementación de la metodología e ilustrar los resultados. Los casos ofrecen un punto de vista práctico orientado a la mejora y la toma de decisiones. Permiten dar una visión del mantenimiento más amplia, no sólo la del punto de vista del gasto que supone a nivel contable.

Dentro de los conceptos relacionados, las "garantías del desempeño en el funcio – namiento (garantías de performance)" son usadas para la mejora continua del diseño de una alternativa, minimizar los impactos sobre el cliente/usuario de una solución, y transferir los costes/beneficios de la misma a la "Parte" responsable de su diseño y selección. Ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo de toma de decisiones basado en el riesgo desarrollado en este trabajo. Forman parte en el modelo del proceso de decisión (en el nivel 1) y de selección de la mejor alternativa.

Como conclusión, la metodología desarrollada busca reducir los efectos diferidos (económicos, accidentes, paradas no programadas, repercusiones sociales, otros) que emergen en la fase de operación vinculados a errores, tanto de diseño como de toma de decisiones, en la fase de adquisición.

INTRODUCCIÓN Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

1. ANTECEDENTES.

La producción industrial es el mayor contribuyente a la economía global, con casi tres cuartas partes del comercio mundial (Scheele, 2002). Dentro de este contexto, el mantenimiento ha ido adquiriendo una importancia cada vez mayor (Goti, Oyarbide – Zubillaga y Sánchez, 2007) hasta llegar a convertirse en un factor clave en el entorno de competitividad actual (Rodríguez Darnés, 2000). Así, varios estudios recopilados por Mjema (2002) muestran que los costes de mantenimiento representan entre un 3 y un 40% (con un valor medio del 28%).

Dentro de la gestión del mantenimiento, varios autores insisten en la importancia de establecer vínculos directos entre la toma de decisiones en mantenimiento y los resultados económicos. Estos trabajos pueden ser considerados como herramientas para la optimización del mantenimiento respecto a criterios económicos. Dentro de este tipo de herramientas de optimización, se establecen dos tipos de elementos diferenciados: los modelos de referencia y los modelos matemáticos.

Dentro de los modelos de referencia, se encuentran instrumentos tales como el Life Cycle Cost (Fabricky, 1997), el método Bouchy (Souris, 1992), el método Brodier (Souris, 1992), el Money Centered Maintenace (Legát, Jurca, y Hladik, 2004) y el Value Driven Maintenance (Mantenimiento Guiado por el Valor - Haarman, 2005).

En cuanto a la investigación relacionada con el modelado matemático y la optimización del mantenimiento, las siguientes referencias presentan cientos de artículos en los que se trata de establecer vínculos directos entre parámetros relaciona - dos con el mantenimiento y variables económicas: Dekker,1996; Dekker, Wilderman y Van der Duyn Schouten, 1997; Goti, 2007.

No obstante, a pesar de contar con todas estas herramientas técnicas, Dekker (1996) afirma que el mantenimiento ha sido descrito como la última frontera de la gestión científica por la baja cantidad de casos reales de aplicación desarrollados en el ámbito del mantenimiento.

Otra consideración a tener en cuenta dentro de la gestión del mantenimiento es su efecto en los costes de la no calidad que provocaría una gestión incorrecta, tales como: productividad, costes administrativos, de tiempo y recursos redundantes, costes de ga - rantías, imagen de la empresa.

1.1. Diagnóstico del estado del mantenimiento industrial en España.

El objetivo del presente apartado es mostrar el estado del mantenimiento industrial en España. Adicionalmente, se analiza el grado de aplicación de herramientas de apoyo a la decisión que traduzcan variables de mantenimiento a términos económicos. Para cumplir tales objetivos se ha recopilado información de una encuesta respondida por un número significativo de responsables de mantenimiento de la industria española dentro de los trabajos quinquenales presentados por la Asociación Española de Mantenimiento, AEM (2000 y 2005), también basados en encuestas. Se toma como referencia el artículo publicado por Goti-Elordi, et al., 2009.

1.1.- 0. Material y métodos.

Se utiliza un cuestionario dado que la investigación pretendía mostrar el estado del mantenimiento industrial en España y obtener información representativa respecto a un determinado ámbito geográfico. El cuestionario fue diseñado a partir de las pautas ofrecidas por Gillham (2001) y Yin (1989) y fue respondido por responsables de mantenimiento de 135 plantas industriales en el periodo comprendido entre enero de 2005 y junio de 2008.

Indicar que los resultados del quinquenio 2005-2010 no varían significativamente con los presentados aquí.

1.1.-1. Resultados.

Los siguientes apartados recogen los resultados obtenidos en el estudio:

1.1.- 1.1. Perfil de la muestra.

En la figura 1 se muestra información sobre el tamaño de la empresa, la proporción de mantenimiento propio respecto al subcontratado y los tipos de mantenimiento apli - cados en planta.

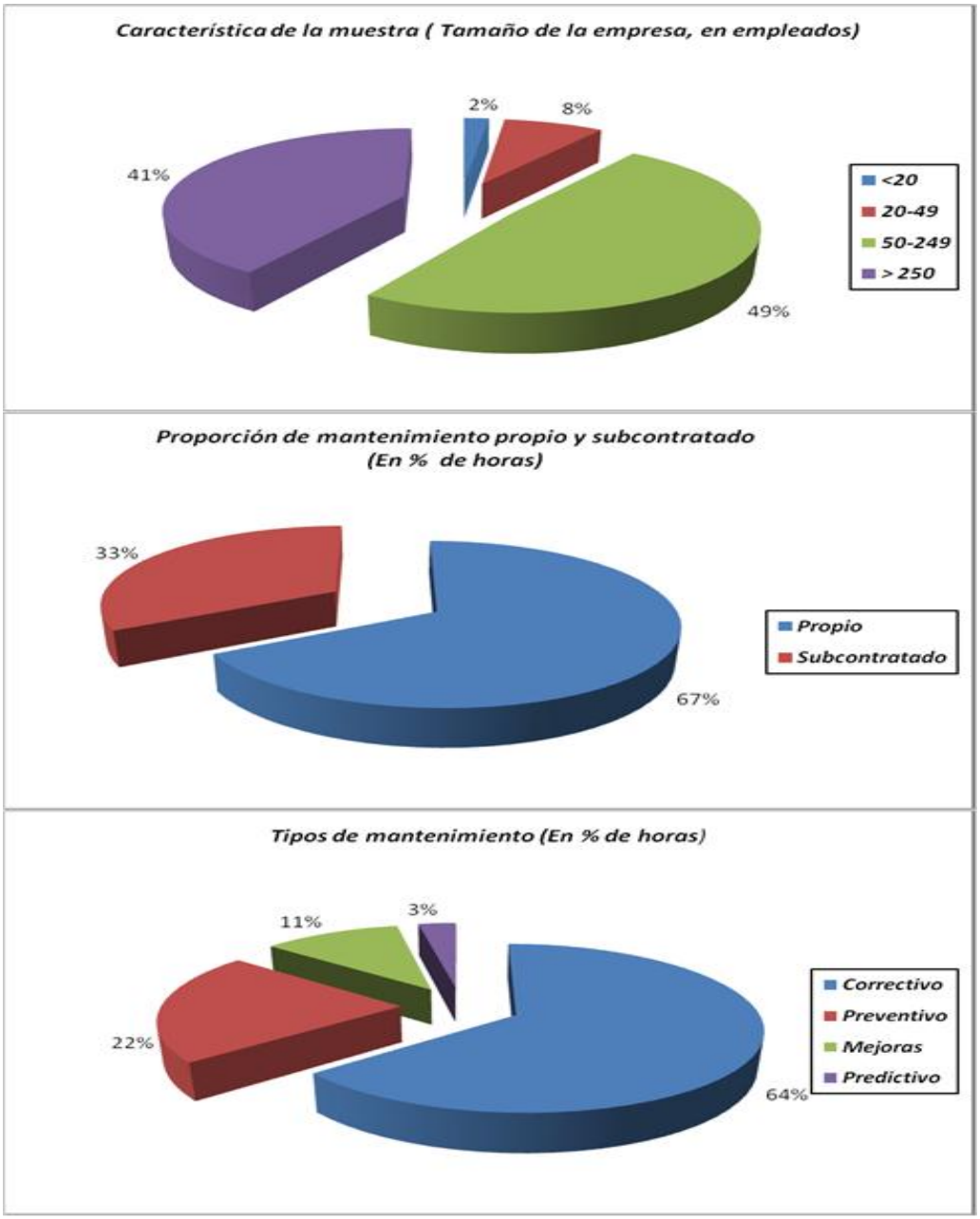


Figura 1: Información sobre el perfil de la muestra

Tal y como se aprecia en la figura, la muestra contempla empresas de muy distintos tamaños, pero se centra principalmente en las medianas y grandes. Así mismo, se puede decir que las plantas estudiadas cuentan con un mantenimiento, principalmente propio, y centrado en el correctivo.

1.1.- 1.2. Análisis 1: Grado de conocimiento y aplicación de herramientas orientadas a la optimización del mantenimiento.

Las siguientes figuras muestran el grado de conocimiento y aplicación con el que cuentan las empresas respecto a herramientas orientadas a la optimización del mantenimiento bajo criterios económicos.

La figura 2, responde a la pregunta de cuántas empresas cuentan con un programa de Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador (GMAO) para gestionar su mantenimiento, y cuántas realmente lo utilizan sistemáticamente para la gestión de sus actividades.

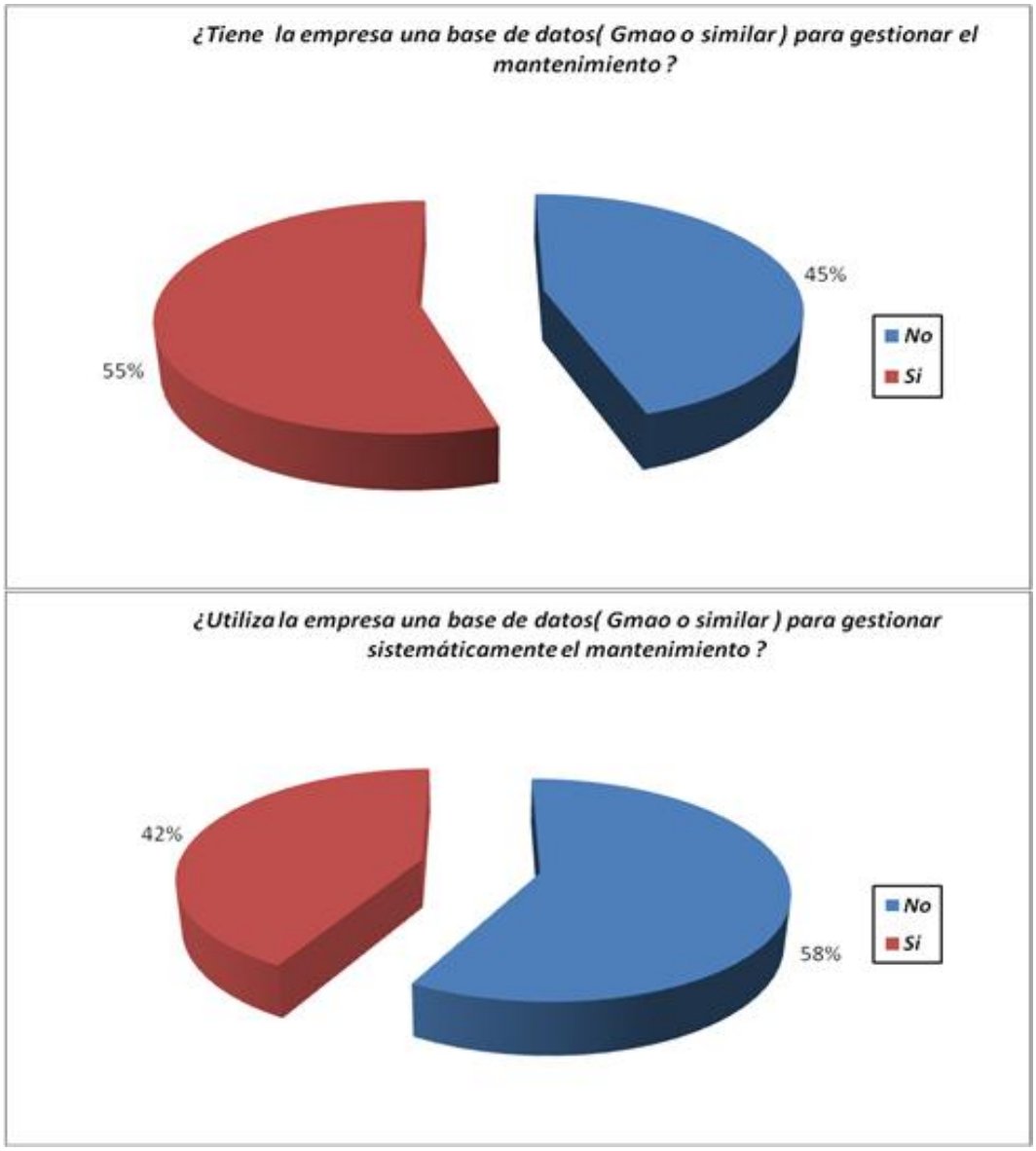


Figura 2: número de empresas que cuentan con y utilizan un GMAO.

Del análisis de la figura destaca, como dato significativo, que existe un 13% de empresas que contando con un GMAO no lo utilizan para la gestión sistemática de sus actividades de mantenimiento. La cuestión que cabe plantearse sería: ¿Por qué no la utilizan si cuentan con la herramienta?

La figura 3, muestra el grado de sistematización de las decisiones tomadas con criterios económicos:

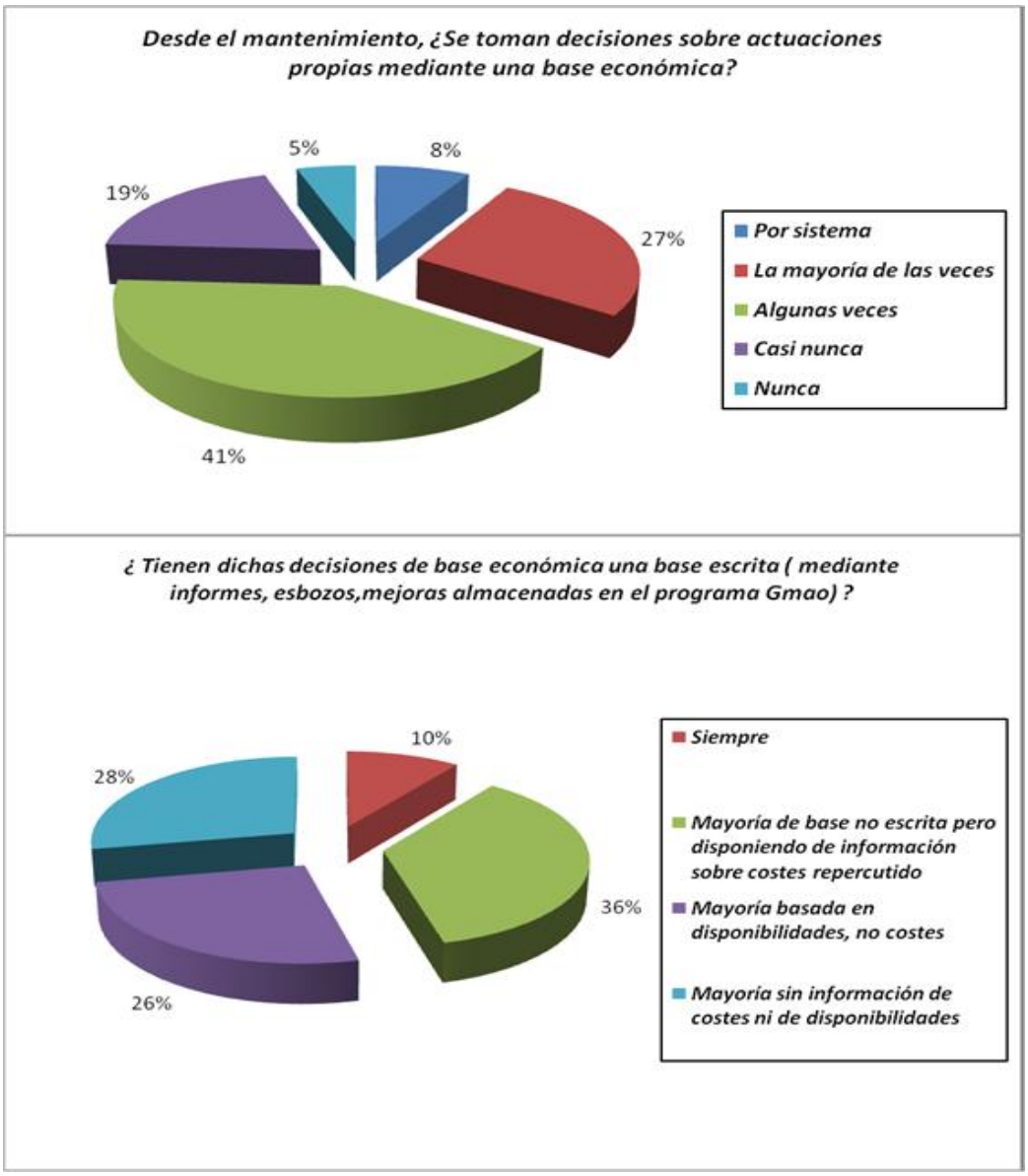


Figura 3: Detalles del grado de sistematización de las decisiones tomadas con criterios económicos.

En referencia a las figuras, dos conclusiones:

- no se puede afirmar que las decisiones de mantenimiento se tomen teniendo siempre en cuenta criterios económicos;
- no es posible concluir que exista un procedimiento riguroso (minimamente escrito/documentado) para la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento.

Las figuras 4 y 5 preguntan directamente si los técnicos conocen alguna herramienta, total o parcial[(1)] orientada a la optimización del mantenimiento con criterios económicos. Como se indicó en la introducción, estas herramientas comprenden tanto los modelos de referencia como los modelos matemáticos.

(1) se entiende como parcial, el hecho de ser aplicable a un ámbito específico, como el control de repuestos, y no al mantenimiento en general.

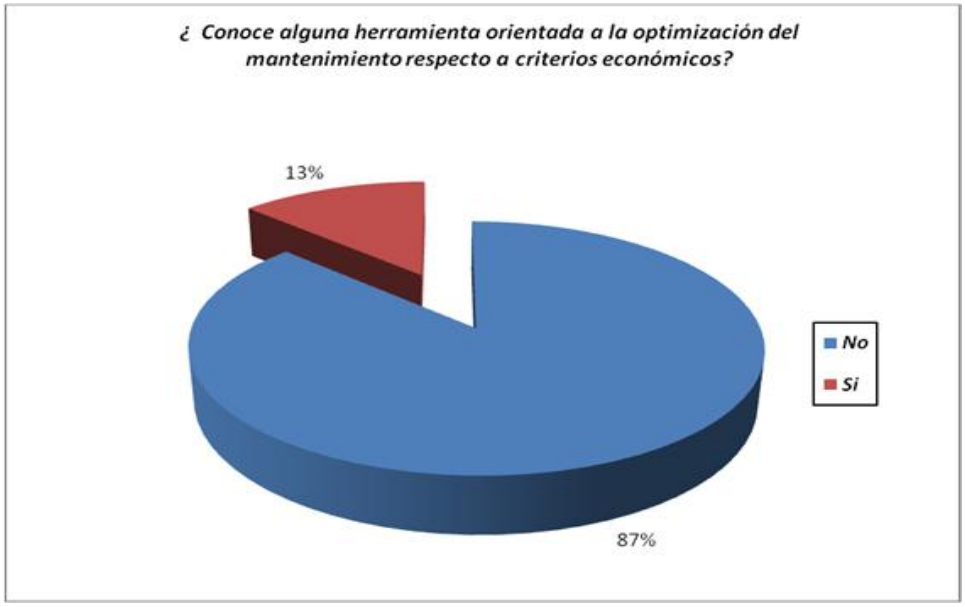


Figura 4: Grado de conocimiento de herramientas orientadas a la optimización del mantenimiento con respecto a criterios económicos.

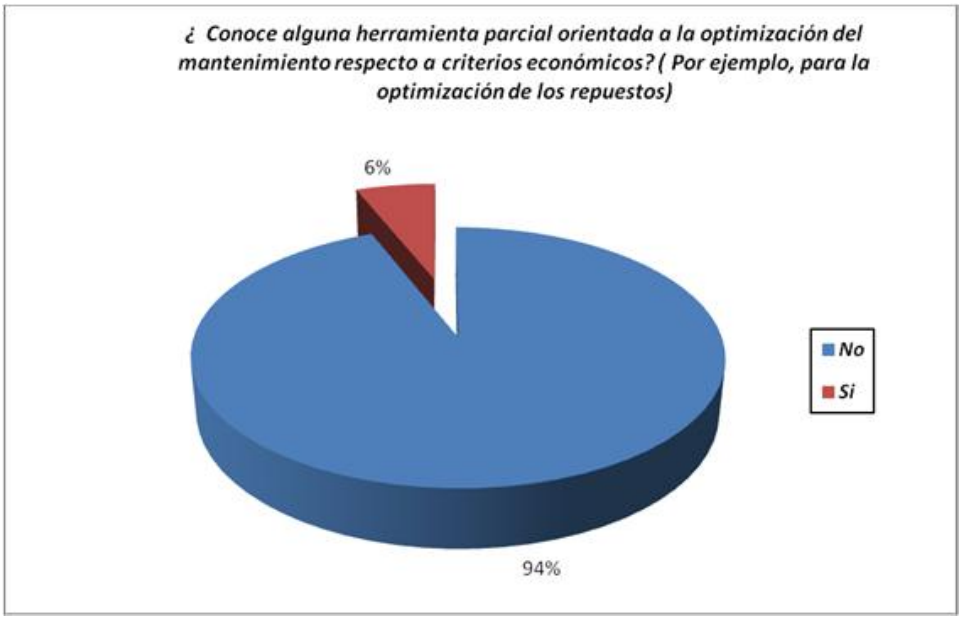


Figura 5: Grado de conocimiento de herramientas parciales (válidas únicamente para ciertas actividades de mantenimiento) orientadas a la optimización del mantenimiento con respecto a criterios económicos.

Las figuras muestran, para ambas cuestiones, una clara falta de conocimiento de este tipo de herramientas. Los técnicos que respondieron positivamente a alguna de las dos cuestiones anteriores listaron las siguientes herramientas como orientadas a la optimización del mantenimiento con criterios económicos: los programas GMAO, la modelización y optimización matemática, la traducción de Overall Equipment Effectiveness (Efectividad Global de los Equipos) a términos económicos y los análisis de costes y beneficios.

En referencia al dato, cabe plantearse el por qué de esta situación.

En la figura 6, los técnicos fueron preguntados sobre la necesidad de disponer e implantar una herramienta para la optimización del mantenimiento con criterios económicos.

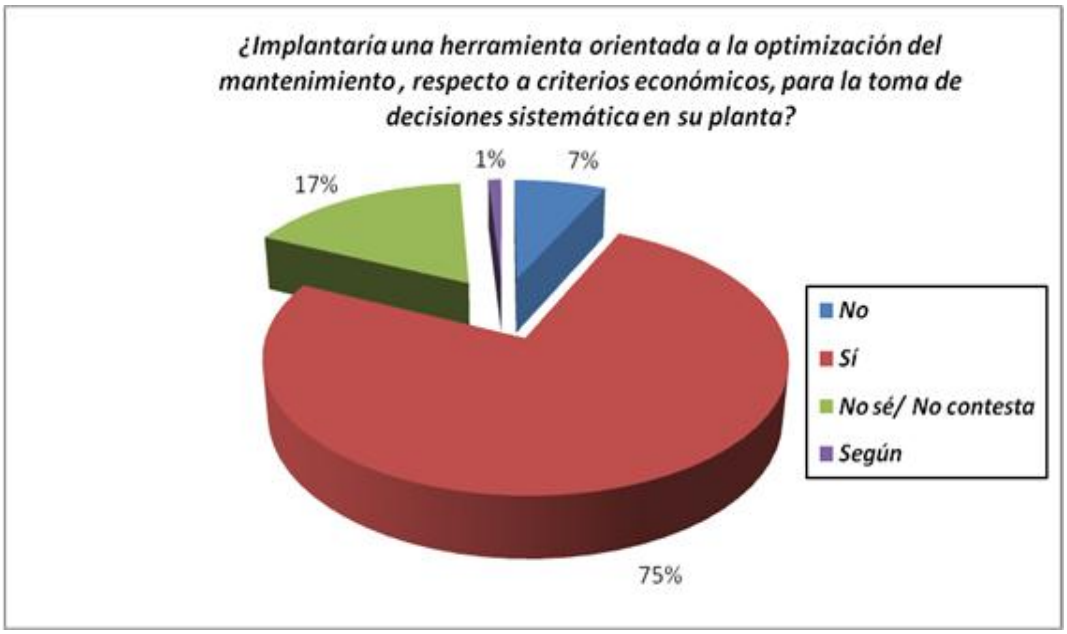


Figura 6: Interés en la implantación de una herramienta orientada a la optimización del mantenimiento con criterios económicos.

Del análisis de los resultados se extrae, como conclusión importante, que **existe una aplicación muy limitada de herramientas enfocadas a la gestión (optimización) del mantenimiento con criterios económicos, pero un gran interés en el conoci - miento, desarrollo y aplicación de este tipo de herramientas de gestión.**

1.1.- 1.3. Análisis 2: Grado de Registro de las actuaciones y de análisis de las actividades de mantenimiento.

Una vez analizado el grado de conocimiento disponible sobre herramientas que permiten la optimización del mantenimiento, se pasó a **analizar el nivel de rigurosidad con el que se gestionan las actividades** rutinarias de correctivo, preventivo y mejoras (las mejoras se entienden como aquellas modificaciones orientadas a aumentar la fiabilidad de los equipos).

La figura 7 describe como se gestionan las incidencias del mantenimiento correctivo. En concreto, la figura detalla cuántas empresas, de entre las encuestadas, registran las incidencias de mantenimiento correctivo (síntomas, causas y soluciones) así como cuántas utilizan el histórico desarrollado para el diagnóstico de incidencias:

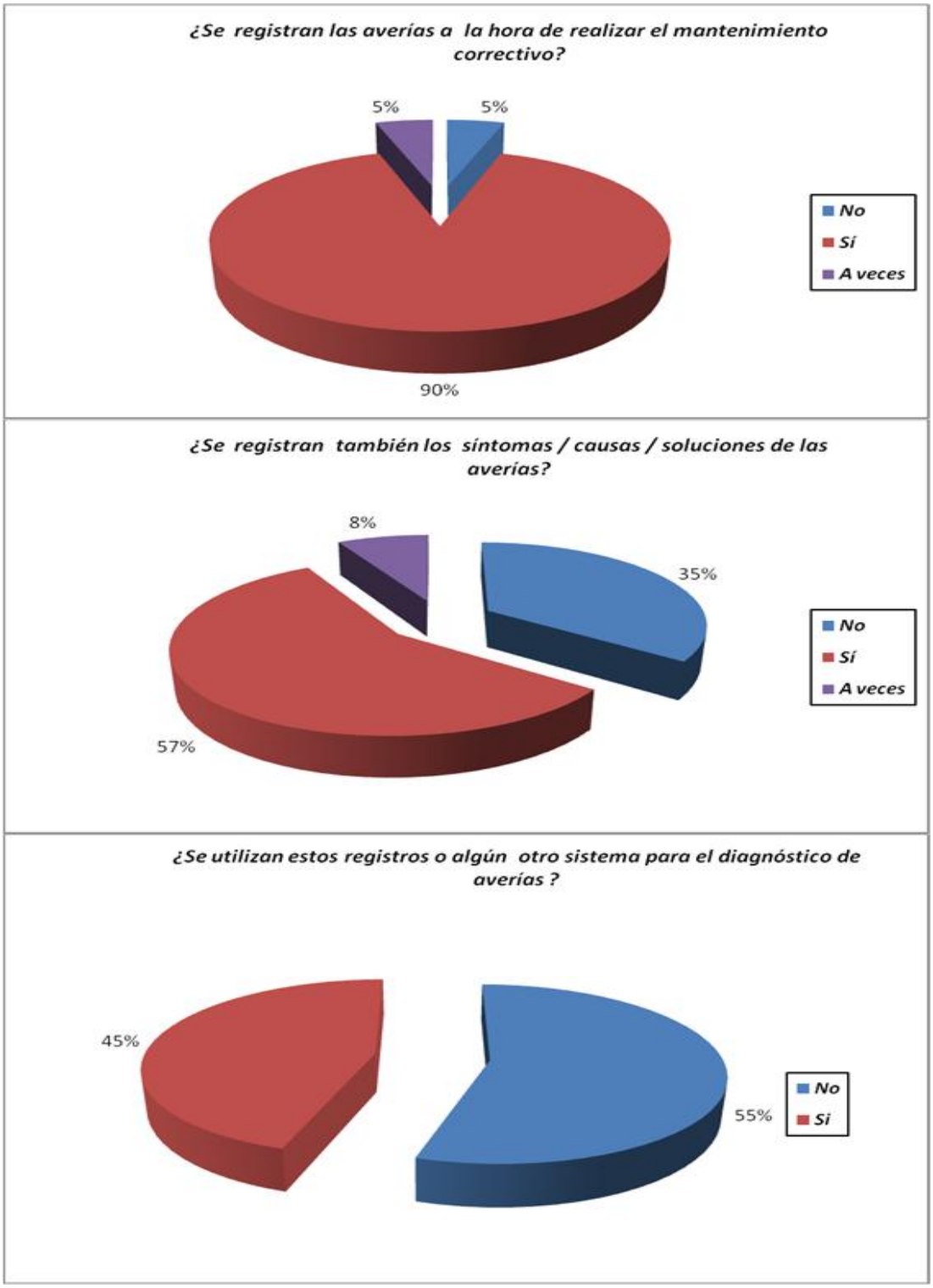


Figura 7: Gestión del mantenimiento correctivo.

Los datos muestran, como conclusión principal, que **aunque el 90% de las plantas registran sistemáticamente sus incidencias, sólo la mitad de estas utilizan registros para el diagnóstico de averías**. Así mismo, destacar que **el 33% de las compañías que registran sus incidencias de mantenimiento no almacenan información técnica que podrían necesitar en un futuro** (síntomas, causas, soluciones o iniciativas para el diagnóstico de averías) **para la planificación y programación**, por ejemplo, de otras estrategias de mantenimiento (preventivo, predictivo o proactivo).

La figura 8 presenta la información respectiva al mantenimiento preventivo y las mejoras. En concreto, en esta parte de la encuesta se analiza si se cuenta con un plan de mantenimiento preventivo en sus plantas, si éste es actualizado periódicamente y si se fomenta la implicación/compromiso de los proveedores en la mejora de la fiabilidad de los equipos.

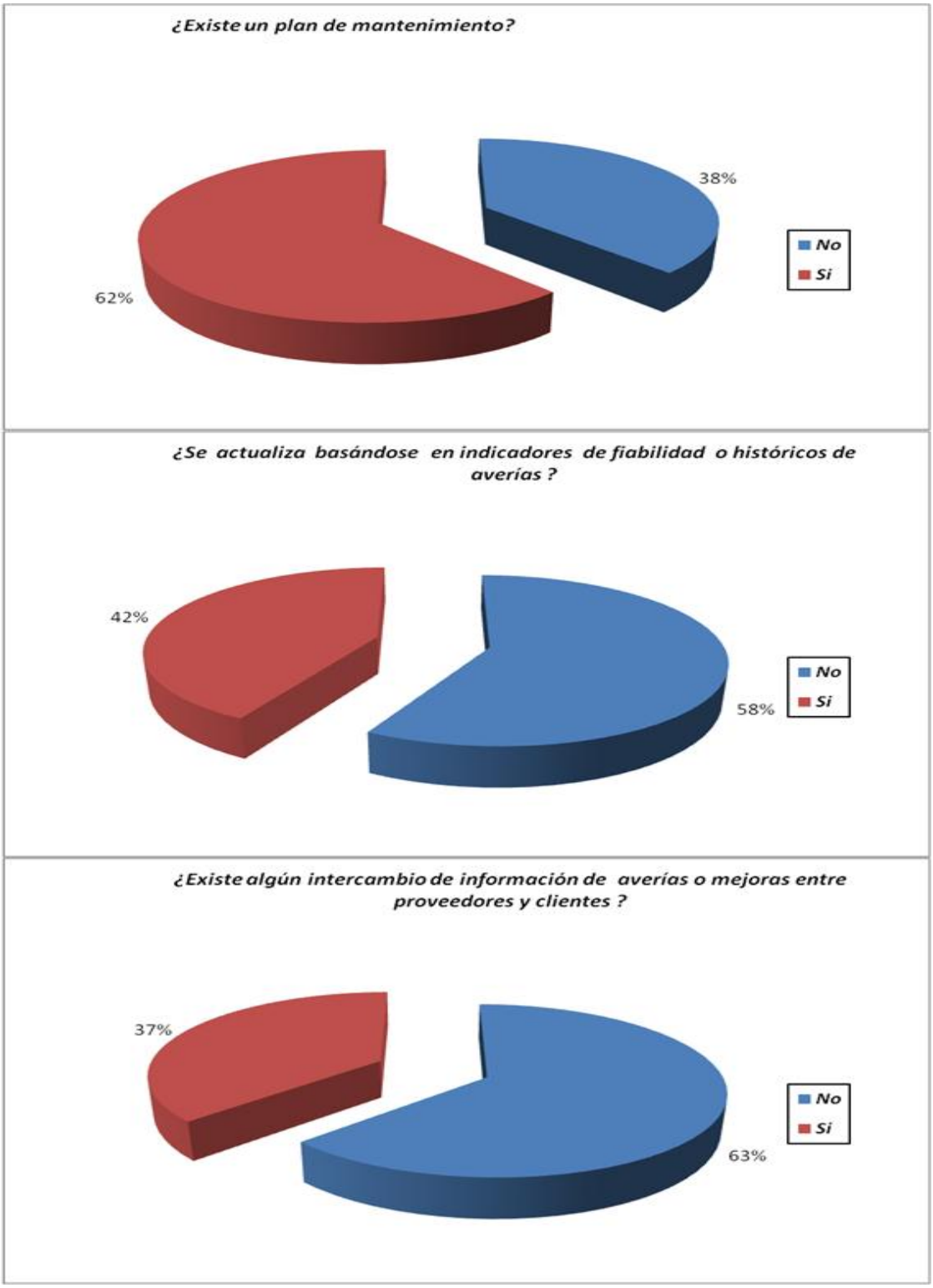


Figura 8: Gestión del mantenimiento preventivo y mejoras.

Como se aprecia, la mayoría de los responsables encuestados cuentan con un plan de mantenimiento preventivo en sus plantas. Sin embargo, del 62% que respondió que cuenta con un plan de mantenimiento, sólo el 42% cuenta con un plan actualizado (ajustado a las necesidades cambiantes de los medios). Finalmente, también se recoge que en el 63% de los casos no existe un intercambio de información cliente - proveedor orientada a que el proveedor pueda mejorar el diseño de sus productos para hacerlos más fiables.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS.

Como se ha podido constatar del estudio analizado en el apartado anterior, varios autores insisten en que el mantenimiento es una actividad clave en la industria. En este contexto, la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos de la empresa en un contexto de alta competitividad como el actual.

La gestión del mantenimiento juega un papel relevante como función de negocio. Sin embargo, aún sigue sin prestársele la atención debida dentro de las empresas como tal función. De hecho, tradicionalmente, el mantenimiento ha sido considerado como un mal necesario, siendo contemplado mas como un gasto que como una inversión. Aún hoy en día, son muy pocas las empresas que consideran el mantenimiento como una función estratégica para el éxito de sus operaciones.

Aunque el impacto del mantenimiento sobre los resultados económico -financieros, la competitividad y rentabilidad económica de la empresa puede ser relevante, la gestión del mantenimiento ha sido descuidada durante mucho tiempo, tanto a nivel práctico como de investigación. Hay buenas razones para confiar en que los modelos cuantitativos y los Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones (DSS) pueden contribuir, de forma importante, a la toma de decisiones en mantenimiento, al control y la gestión dinámica del ciclo de vida de los sistemas técnicos y, a la sustitución de los juicios subjetivos por criterios más objetivos soportados por análisis cuantitativos.

Las tendencias actuales en fabricación han conducido a una reducción de los niveles de inventarios de reserva (buffer) y a un aumento de los niveles de automatización y complejidad de los equipos. En este contexto, la adopción de estrategias y políticas de mantenimiento efectivas resultan imprescindibles para la competitividad y la rentabilidad económica de los sistemas. Será necesario:

- saber gestionar capacidades y técnicas con objeto de poder integrar personas, políticas (tácticas), equipos y prácticas.
- Adecuar las capacidades de la ingeniería y la tecnología con objeto de posibilitar el mantenimiento preventivo, las reparaciones y las revisiones.

Es importante examinar las diferentes situaciones de fabricación, desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, con objeto de poder diseñar un sistema que dé respuesta eficiente a la estrategia OM (Gestión de Operaciones).

De igual modo, para la construcción de un modelo cuantitativo que se adapte a las necesidades y especificidades de la organización será necesario, no sólo un conocimiento riguroso de las técnicas OR/MS, sino también entender las principales claves de funcionamiento de una organización y las prácticas de mantenimiento requeridas.

Del trabajo de investigación realizado por Goti-Elordi, Aitor, Egaña-Errasti, Miguel María, Iturritza- Pérez de Albéniz, Alfredo (2009) y que complementa los trabajos quinquenales presentados por la AEM (Asociación Española de Mantenimiento 2005; Jiménez, Valencia y Nicolás, 2000) se extraen las siguientes orientaciones:

- Es necesario estructurar la función mantenimiento; es decir, establecer las bases de un sistema de gestión del mantenimiento que sirva para recopilar, analizar y estudiar las actividades realizadas.
- La estructura definida debe de servir como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en mantenimiento.
- Una vez que la gestión del mantenimiento cuente con unas bases sólidas (estructura), es imprescindible que la investigación se centre en el desarrollo de técnicas enfocadas a su optimización y centradas en el usuario final.
- Existe una muy limitada aplicación de herramientas enfocadas a la optimización del mantenimiento respecto a criterios económicos. El trabajo no hace más que confirmar lo que afirmaba Dekker (1996) hace más de una década, quien justifi - caba la baja cantidad de este tipo de aplicaciones por tres motivos:

(a) Falta de herramientas de aplicación que se adecuen a la realidad de la planta.
(b) Falta de datos (relevantes y oportunos).
(c) La importante distancia que existe entre la teoría y la práctica, justificada por:
- La complejidad de los modelos desarrollados (NP-hard).
- Al hecho de que los modelos no son aplicables por los técnicos en las empresas al haber sido desarrollados como fin, y no como medio.
- No todas las decisiones en mantenimiento pueden ser sometidas a un proceso de optimización.
- Los modelos se concentran, a veces, en tipos de mantenimiento equivocados.

- La mayoría de las empresas industriales no cuentan con procedimientos de captura y análisis de datos. Merece destacar que sin estos procedimientos resulta prácticamente imposible implantar una herramienta orientada a la optimización del mantenimiento bajo criterios económicos.
- Subrayar que la gran mayoría de las empresas han mostrado un gran interés en el desarrollo y la aplicación de herramientas para la optimización del manteni - miento con criterios económicos.

Por otro lado, la competitividad está haciendo bascular el orden de importancia ha - cia el aseguramiento del estado, lo cual depende de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación.

Varios estudios japoneses (relacionadas con el TPM) muestran que las pérdidas vinculadas a la eficiencia son mayores que las pérdidas vinculadas al downtime. Sin embargo, la eficiencia ni se registra ni se controla. Una forma de controlar esta variable sería a través de la utilización combinada de datos de mantenimiento con datos finan - cieros, lo que contribuiría a identificar y resolver problemas crónicos que afectan nega - tivamente al ROFA (Return On Fixed Assets)* de un sistema.

La misión básica de la gestión de activos es minimizar el LCC a la hora de producir un producto o servicio con objeto de maximizar el ROFA. Dado que la gestión del mantenimiento contribuye al objetivo anterior, sería interesante los procesos de optimi - zación, en la fase de diseño, para mejorar la eficiencia del sistema y alcanzar la máxima efectividad (productividad) y el máximo beneficio, en la fase de operación.

Hay que tener presente que la productividad de un sistema técnico ($p < 1$) se ve afectada por las pérdidas vinculadas a los problemas que puedan aparecer, en la fase de utilización, en los procesos de operación y mantenimiento. Por tanto, la "productividad real neta" dependerá de la eficiencia de la instalación (η: Fase de diseño) y la efec – tividad de los procesos de O&M (Fase de operación).

(*) *El ROFA es un indicador utilizado en la planificación estratégica de los activos físicos de una instalación.*

Por otro lado, el desequilibrio existente entre los Costes de Adquisición y Soste – nimiento, demuestra la conveniencia de:

- Utilizar como criterio de adquisición de activos la información del LCC, más que el bajo coste inicial de compra.

Es importante tener en cuenta que una parte significativa de los costes de mantenimiento, en la etapa de operación, pueden ser pronosticados en las fases de diseño y proyecto; en estas etapas previas son más fáciles de corregir/evitar que cuando los activos están en producción. Por tanto, resulta interesante, que en esta etapa, no sólo se consideren los requerimientos funcionales, sino que también se adapte y desarrolle el diseño para aumentar la disponibilidad, la fiabilidad y reducir los costes de manteni - miento en la fase de operación.

- Implicar/comprometer al personal que gestiona el mantenimiento en las etapas ini - ciales de concepción y diseño del sistema y sus procesos.

Como conclusión, la Función Mantenimiento, como función de negocio, debería dar respuesta en los tres niveles que garantizan la competitividad:

1. En el nivel inicial de inversión, con exigencias de diseño, construcción y montaje.
2. En los costes operativos, a través de la política/estrategia de mantenimiento seleccionada.
3. A nivel de facturación, según la capacidad que presente continuamente para garantizar el estado del equipo.

El objetivo principal, y especialmente para la mayoría de los sistemas técnicos de proceso continuo, debería estar centrado en reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos. Tanto la instalación ("hard") como los procesos de operación y manteni – miento ("soft") vinculados a la solución adoptada, en la fase de diseño, deberían estar sujetos a un proceso de optimización con objeto de minimizar las "pérdidas" y maximizar el ROI.

Como contribución se resume, en los siguientes puntos, los aspectos más relevantes del análisis del problema utilizados para centrar el desarrollo del trabajo de tesis:

- La Gestión del mantenimiento es un área joven que ha emergido por la compleji - dad y dinámicas del mercado. Esto ha hecho que no se le haya prestado atención al establecimiento de una estructura, lo que indica, que no existe un marco de trabajo generalmente aceptado para definir dicha función.
- Las actuaciones de mejora sobre los procesos de producción (programas de calidad, mejora continua, reingeniería de procesos, etc.), los avances tecnológicos y el aumento de los niveles de competitividad, han puesto de relieve la importancia del papel del mantenimiento como función de negocio; ello ha hecho que la toma de decisiones, en el ámbito del mantenimiento, sea extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos de la empresa en un contexto de alta competitividad como el actual.
- En las industrias de procesos continuos (plantas de producción eléctrica, químicas, de laminación, parques eólicos, etc.), y cada vez más, en empresas de procesos discretos altamente automatizadas, el alto valor total de las instalaciones hace que las interrupciones del flujo productivo reviertan sobre los ritmos de amortización de los equipos y los resultados económicos.
- En el contexto de los nuevos "contratos integrados" (D&C - Design & Construct, DBM - Design & Built & Maintain y DBFM - Design, Build, Finance and Maintain), el contratista asume responsabilidades, no sólo de proyecto, sino también de construcción,

mantenimiento y financiación. En este tipo de contratos es necesario (en la fase de diseño), en base al interés y los objetivos del cliente, rigor en el diseño y una orientación hacia la gestión del ciclo de vida del sistema.

- La política de mantenimiento elegida afecta al comportamiento al fallo, y por tanto, a la capacidad de producción disponible y los costes de operación.
- Un hecho que oscurece especialmente la importancia del Mantenimiento es que sus costes parecen fácilmente medibles. Sin embargo, los beneficios asociados a una buena política de Mantenimiento quedan inmersos en la propia productividad, con lo cual, no son fácilmente identificables, y por tanto, cuantificables.
- El mantenimiento debe ser considerado como una función; esto es, como un con - junto de actividades vinculadas a una serie de procesos cuyo objetivo principal es incrementar los niveles de fiabilidad del sistema.
- Es importante tomar conciencia de que se trata de una función compleja, multidi - mensional, y que interrelaciona con funciones claves a nivel corporativo.
- Se comienza a poner en valor la idea de transitar de un mantenimiento centrado en la intervención (reactivo) a un nuevo enfoque centrado en la prevención y el aseguramiento del estado (proactivo).
- Se detecta la necesidad de una gestión más científica, tanto a nivel estratégico, como táctico, y operativo, que permita el "remplazo" de decisiones soportadas por crite - rios subjetivos por decisiones más objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos, tales como análisis de sistema y la construcción de modelos matemáticos.
- Una de las líneas abiertas en la investigación relacionada con la gestión del mantenimiento es el desarrollo de técnicas que ayuden a la toma de decisiones a los responsables del mantenimiento.
- Es necesario más investigación para que los modelos matemáticos existentes contemplen las hipótesis reales de producción y mantenimiento. Igualmente, es necesario su adaptación y ampliación para dar respuesta a otras demandas a nivel organizativo, técnico, financiero, etc.
- Se observa la necesidad de aumentar la orientación de la investigación OR/MS sobre aplicaciones relacionadas con la toma de decisiones en la Gestión de Operaciones.
- La investigación ha estado centrada en la búsqueda de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en los niveles táctico y operativo. No se ha ocupado, de momento, del nivel estratégico y su integración con los niveles táctico y operativo.
- Se detecta la necesidad de desarrollar métodos para minimizar los problemas del sobremantenimiento preventivo y de resolver los problemas de programación del mantenimiento (optimización del backlog, entre otros).
- La fiabilidad y la mantenibilidad tienen una gran influencia sobre el coste del ciclo de vida (Hansen, R.C., 2001). Por tanto, sería interesante la planificación coordinada del mantenimiento y su soporte logístico en la fase conceptual (preliminar) del diseño.
- El problema de minimización del downtime es complejo dado que depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capacidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambientales, etc.). Es importante, por tanto, una acertada planificación de la O&M.
- El mantenimiento es un área que comprende muchos aspectos diferentes. Es un término genérico que se utiliza para referirse a una variedad de acciones sobre todo tipo de sistemas técnicos, los cuales se deterioran de formas diferentes. Por tanto, no es posible encontrar modelos generales que cubran todos los casos.

- A pesar de que existen múltiples modelos, existe poco conocimiento sobre su aplicabilidad. Es necesario una unificación de los modelos existentes y una revisión crítica de su aplicabilidad, más que construir modelos nuevos.
- La gestión del mantenimiento es una función que aún está bastante desestructurada.
- Debido al carácter complejo de la gestión del mantenimiento, existen elementos que no son aptos/apropiados para la modelización matemática, como por ejemplo, determinados aspectos relacionados con el personal y la organización.
- Existe poca bibliografía sobre Informes de funcionamiento/desempeño (performance) del mantenimiento. De acuerdo con nuestra investigación, no existen demasiados trabajos recientes sobre el tema.
- Por tanto, existe la necesidad de desarrollar una metodología que permita definir, diseñar y evacuar informes de desempeño que apoyen la toma de decisiones sobre base científica. El propósito de la investigación, a nivel académico, debe resolver *la necesidad de reducir juicios subjetivos por análisis cuantitativos.*
- Falta de procedimientos rigurosos/fiables de recogida y procesamiento de datos en tiempo real.
- El problema de la recogida de los datos no ha sido tratado suficientemente en la literatura.
- Carencia de bases de datos apropiadas y fiables.
- Carencia de datos históricos fiables.
- Se observa la necesidad de <u>desarrollo de elementos remotos que permitan obtener parámetros críticos de estado para el diagnóstico y pronóstico</u>, de forma fiable, del estado de un equipo; ello favorecería mejoras en los trabajos de inspección, los programas de preventivo – predictivo y en las valoraciones de los resultados.
- Señalar la importancia de evitar fallos para mejorar la eficacia del mantenimiento (condición previa para conseguir la eficiencia).
- En la fase Conceptual (preliminar) de cualquier proceso o sistema de nueva inversión es donde es más fácil incorporar o implementar un cambio o una mejora. Durante las fases de Detalle del diseño (desarrollo) y Producción y/o construcción, las influencias de las mejoras tienen mayores resultados, pero la facilidad para incorporarlas o aprobarlas es mínima. Una vez el sistema es construido y se encuentra en la fase de Utilización, las posibilidades de mejorar su eficiencia son prácticamente nulas. De igual modo, en esta fase, es difícil justificar una nueva reforma, una modificación o una gran parada (Fabrycky, W.J. y Blanchard, B.S, 1991).
- Los efectos de adoptar una solución deficiente ("patologías de diseño") normalmente emergen en la fase de utilización, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.
- Es necesario realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar para determinar y conocer los principios de funcionamiento e identificar las categorías y la estructura de costes significativos con objeto de que la STM (Solución Técnica y de O&M) propuesta cumpla con las funciones, a nivel técnico y económico, que se le exige a largo del ciclo de vida.
- Los aspectos económicos son muy importantes en la ingeniería de sistemas con objeto de garantizar la viabilidad económica del diseño. Existen numerosos ejemplos de estructuras, procesos, y sistemas técnicos, que muestran excelentes diseños físicos, pero que no son viables económicamente (Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991).
- Las situaciones que generan indisponibilidad de las instalaciones productivas repercuten negativamente en la rentabilidad. Para un proceso productivo, no hay

nada más ruinoso que la improductividad de los capitales invertidos en los activos fijos que sustentan las funciones esenciales del proceso.

- Las paradas planificadas están en la frontera entre la ingeniería y la fase de planificación de la O&M. Ello da la posibilidad de reducir las pérdidas asociadas a las mismas a través de una acertada definición de la estrategia de O&M.
- El mundo del mantenimiento carece de un modelo general apropiado que permita a los profesionales del mantenimiento, y a la Alta dirección, comprender y gestionar los procesos internos asociados a la función mantenimiento en sintonía con los ob - jetivos del negocio.
- Resulta interesante, con objeto de evitar la suboptimización, la búsqueda de mode - los que combinen, de forma apropiada y criterio económico, elementos de las áreas de mantenimiento y producción. En la misma línea, también resulta interesante los procesos de simulación.
- Los costes relevantes suelen ser costes ocultos. Ello pone de manifiesto la necesidad del uso de herramientas para el análisis que ayuden a descubrir "propiedades emergentes", sinergias, diferencias competitivas, inductores de ingre - sos y costes y contribuyan, tanto en la fase de diseño como de utilización del sistema, a la identificación de ventajas competitivas.
- El análisis brindado por el estudio LCC da la posibilidad de preparar especifica - ciones optimizadas para los nuevos equipos y sistemas.
- Definir "información" como la respuesta a la pregunta formulada significa que la información sólo se puede deducir de la utilización de un proceso de decisión. Se deben cumplir dos condiciones para adquirir información: datos y proceso de decisión. Un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final; también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de exactitud. (Goldratt, E.M, 1990)
- En un planteamiento orientado hacia el ciclo de vida del sistema (ingeniería concu - rrente), las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un activo (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo. Sin embargo, la práctica habitual en las decisiones de inversión, es tomar como base el precio de compra, lo cual se demuestra que representa una pequeña parte del LCC. Constituye un criterio erróneo de selección en el proceso de decisión.

El alcance del presente trabajo es el estudio de las características especiales del mantenimiento industrial para identificar las claves reales de su funcionamiento, las principales prácticas, las tendencias de mercado (fabricación, operación, mantenimien - to) y las dificultades, a nivel operativo y de gestión, para definir los principales factores sobre los que cimentar la construcción de los modelos que hagan posible la gestión del mantenimiento sobre una base económica.

Como objetivo principal, este trabajo de tesis diseña, desarrolla y propone unos "modelos integradores" para los procesos de decisión, en la fase de diseño y operación respectivamente, de Soluciones STM+C, el control y la gestión dinámica de su ciclo de vida en el contexto de la gestión de operaciones, la calidad total y la reingeniería.

Define una estructura para la construcción de modelos cuantitativos para las fases de adquisición y operación del sistema técnico.

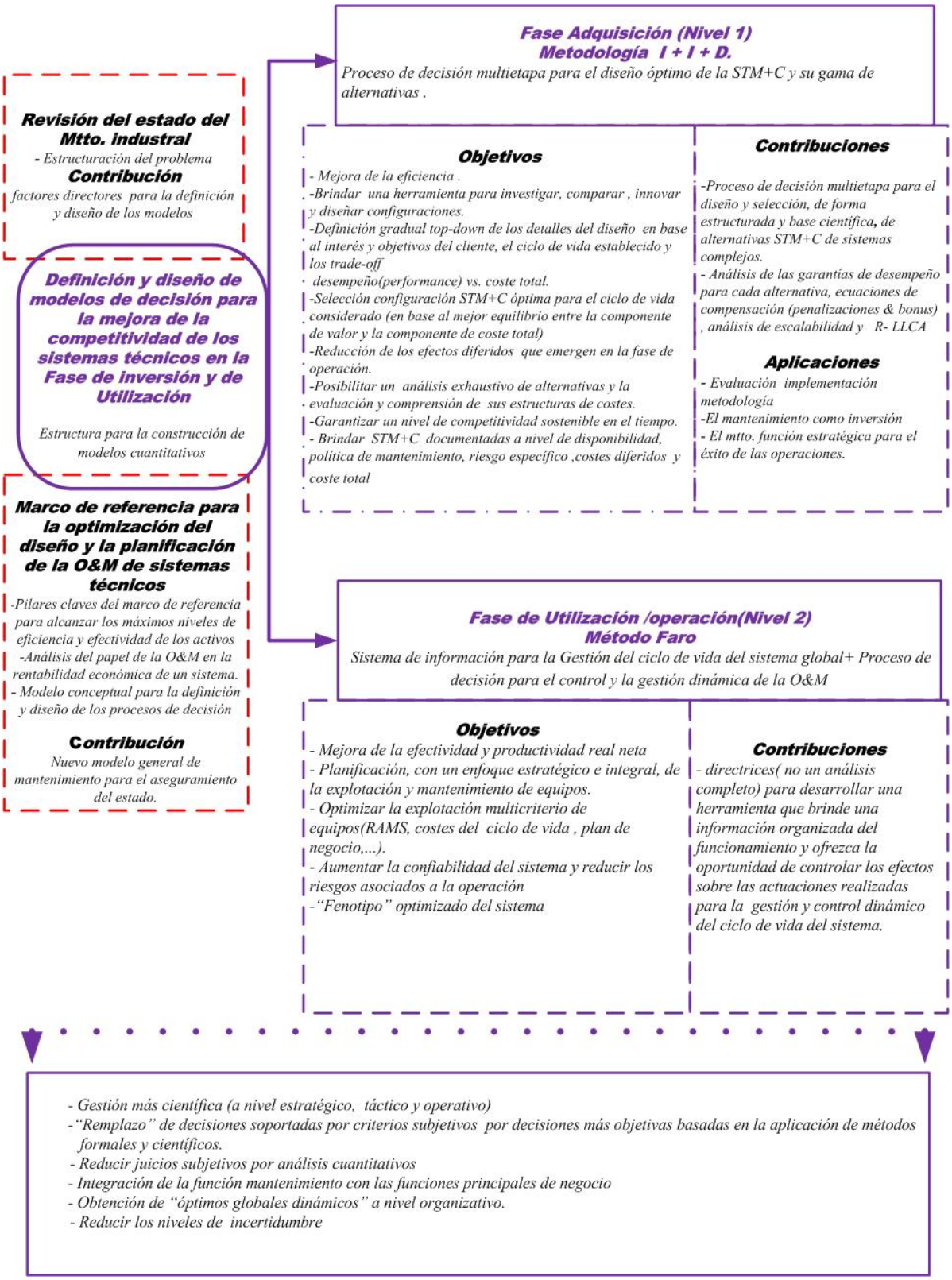


Figura 9. Objetivos y contribuciones básicas de la tesis doctoral.

La figura anterior describe el ámbito de estudio de la tesis, sus objetivos y contribuciones básicas.

3. METODOLOGÍA.

La competitividad está haciendo bascular el orden de importancia hacia el asegura - miento del estado, lo cual dependerá de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación.

Este enfoque (enfoque concurrente) ha de integrar todos los factores necesarios (de sempeño-performance, productividad, fiabilidad, mantenibilidad, factor humano, sopor - tabilidad, calidad, entre otros) para brindar, en función de las necesidades identificadas, opciones de diseño viables.

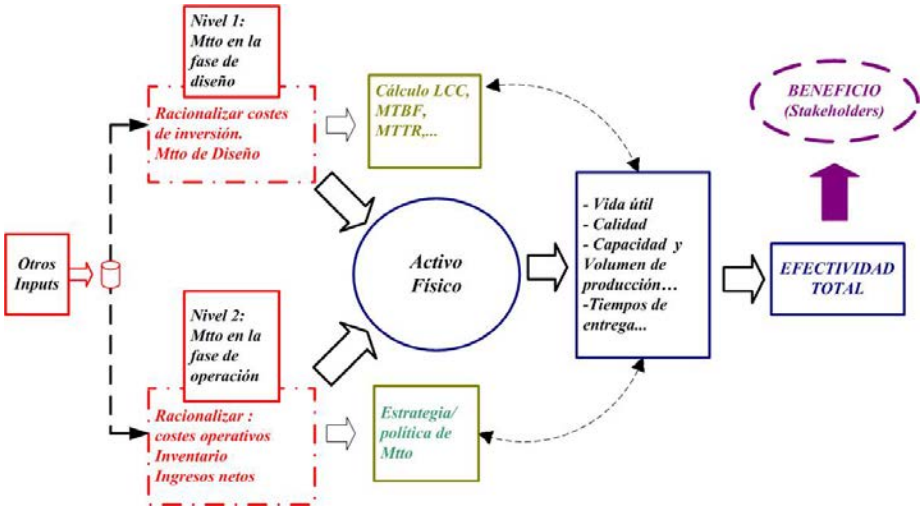
En este contexto, el objetivo de la ingeniería, bajo el paraguas del ciclo de vida (en- foque concurrente), ha de ser el asegurar que el ciclo de vida total del sistema sea con - siderado desde el principio. Consecuentemente, la ingeniería, en este contexto, implica una orientación hacia la gestión del ciclo de vida. Esta orientación, o diseño concurrente, lleva aparejado la convivencia del ciclo de vida del sistema técnico con el ciclo de vida de su sistema soporte.

La metodología se desarrolla tomando como referencia la función mantenimiento, pero puede ser extendida a cualquier área de Gestión de Operaciones. Aporta, como contribución, la integración de la función mantenimiento con las funciones principales de negocio, con objeto de obtener "óptimos globales dinámicos" a nivel organizativo.

El principal reto a la hora de seleccionar y priorizar las tareas de mantenimiento será la cuantificación del ROI (Retorno sobre la Inversión) de la alternativa considerada. En este trabajo, el ROI_M (Retorno sobre la Inversión en Mantenimiento) se valora en base al nivel de reducción del coste del riesgo. La idea es intensificar el concepto de "manteni - miento planificado" y "mantenimiento efectivo" (Conde Collado, et al., 2003) con objeto de reducir los costes potenciales asociados al downtime.

En el modelo desarrollado en este trabajo de tesis, la verdadera planificación no comenzaría con el enfoque tradicional (reactivo) de planificación y programación de los trabajos de preventivo. El concepto se ampliará (enfoque proactivo) para iniciarla con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas ("Guías de Requerimiento de Servicios") y la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planificación").

Atendiendo a los ejes de actuación de la función mantenimiento para la mejora de la competitividad, para el análisis de los procesos de decisión para el diseño de la STM+C y la gestión dinámica de su ciclo de vida, se consideran dos niveles (figura 10):



Beneficio = Facturación – Costes Operativos – Costes de la Inversión (amortizaciones).

Figura 10: Ejes para el análisis de los procesos de decisión para el diseño de la STM+C y la gestión dinámica de su ciclo de vida.

- ***Nivel 1 (Fase de inversión). Proceso de decisión multietapa para el diseño óptimo de la STM+C y su gama de alternativas.***

El principal objetivo, a este nivel, es brindar al analista una herramienta para dos fines básicos:

a) investigar, comparar , innovar y diseñar configuraciones: obtener alternativas STM+C.

b) Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total, para el ciclo de vida establecido.

El proceso de decisión es iterativo y suministra una definición gradual top-down de los detalles de diseño. Está orientado hacia el ciclo de vida del sistema (en base al interés y objetivos del cliente), y se estructura sobre una metodología de toma de decisiones multietapa basada sobre los últimos avances científicos.

El resultado es un informe muy detallado de las alternativas STM+C en el que se recogen aspectos técnicos, de O&M y costes, para cada alternativa.

Se propone una metodología para dos fines, en función de que las decisiones haya que tomarlas a priori o, a posteriori:

- A priori: *diseño* de un sistema confiable, a la vez que flexible, que dé respuesta e-fectiva y eficiente a las demandas dinámicas del mercado.
- A posteriori*:* para un sistema ya existente, *definición del "genotipo técnico y eco - nómico"* para estimar su capacidad (Affordability) y las acciones e inversiones a em - prender para mejorarla, si se considerasen necesarias (retrofit y reburs fishment).

Para el proceso de selección, la metodología permite la definición estructurada de alternativas, e incluye un informe detallado de los parámetros críticos de operación, mantenimiento y coste total, que favorece la investigación e innovación en el proceso de decisión. Posibilita un análisis exhaustivo de alternativas y la evaluación y compren - sión de sus estructuras de costes.

- ***Nivel 2 (Fase de Utilización). Sistema de información para la Gestión del ciclo de vida del sistema global + Proceso de decisión para el control y la gestión dinámica de la O&M.***

En la gestión del ciclo de vida de un sistema nos encontramos frecuentemente con situaciones en las que la información no está inmediatamente disponible, sino que ha de deducirse de los *"datos requeridos"*. Ello indica que el *proceso de deducción* no es algo externo al sistema de información, y que, para muchos tipos de información, el *proceso de decisión*, en sí, debe ser parte integral del sistema de información.

En este nivel, se define y diseña el sistema de información, el proceso de decisión, y la plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.

Uno de los objetivos básicos será comparar los efectos de varios cursos de acciones (efectos de diferentes regímenes o políticas de mantenimiento, decidir una compra o inversión, otros). Típicamente, la evaluación implicará comparar coste con valor añadido. La clave estará en evaluar la efectividad de una opción. La respuesta/salida (fenotipo optimizado) busca la "Efectividad total" del sistema.

En un sentido amplio, el proceso de optimización busca un conjunto de parámetros que minimicen el LCC del sistema global; en un sentido más estricto, la optimización puede ser aplicada a actividades específicas (optimización del diseño, del manteni - miento, de los repuestos, etc.), lo cual orientará futuros proyectos de BPR (Reingeniería de los Procesos de Negocio), Reingeniería de organización o Reingeniería de procesos.

Los problemas a resolver se prevén que sean Problemas de Optimización Multiob – jetivo (POM) para los que habrá que utilizar Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (AEMO´s).

El proceso evolutivo de optimización multicriterio se centrará en la búsqueda de lo mejor, en cada momento del periodo evolutivo (equilibrio dinámico sistema – entorno). Por tanto, los diferentes procesos se actualizarán en función de los "activadores de evo - lución", en cada iteración.

Se propone una *Estructura de Control Dinámica* de apoyo a la toma de decisiones que permita la coevolución de los índices de desempeño (IP´s) del sistema con los cambios asociados, tanto a factores internos como externos.

La plataforma se articula en base a procesos dinámicos (evolutivos) de ayuda a la toma de decisiones para obtener, en cada iteración (evolución), alternativas /soluciones óptima/s globales que estén correlacionadas con la evolución de los parámetros del sis - tema o/y las condiciones del entorno – ambiente (económicas, legales, etc.).

Para el diseño y desarrollo de los modelos se propone una orientación en tres enfoques:

1.- Rigor, a nivel de ingeniería y procesos:

- Adecuación a la realidad de la planta/sistema.
- Centrado en el usuario final/propietario del problema.
- Multidisciplinar y participativo.
- Centrado en los objetivos del negocio. Incluyen los objetivos del cliente, produ - ción, entorno y seguridad.

2.- Orientado a facilitar la comprensión de las interacciones entre funciones:

- Enfoque holístico.
- Proactivo y dinámico.
- Asegurar el funcionamiento efectivo de los activos críticos.
- Conjugue, de forma equilibrada, las dimensiones técnica, económica y financiera.
- Soporte a la toma de decisiones y orientado hacia la mejora continua.
- Que sirva de ayuda a la estructuración de la función mantenimiento.
- Orientados a las TIC´s.

3.- Orientado a facilitar la gestión de las tasas de intercambio (Trade-off):

- Enfoque sistémico e integrador:
    - Soluciones óptimas globales
    - Soluciones dinámicas
- Gestión del conocimiento: El dato como activo (Obtención de datos fiables, rele - vantes y oportunos).

4. ESTRUCTURA DE LA TESIS.

El trabajo de investigación será desarrollado en cinco capítulos principales (Figura 11) que cubren diferentes contenidos con los siguientes propósitos:

- *Capítulo I: Revisión del estado del mantenimiento industrial.* El objetivo es realizar una estructuración del problema que permita, en función de la información que emerja del análisis, identificar los principales factores sobre los que cimentar la construcción de los modelos que hagan posible la gestión del mantenimiento sobre una base económica.

Se analiza:

a) El papel que juega la gestión del mantenimiento como función de negocio.
b) Los aspectos importantes en el proceso de toma de decisiones en mantenimiento.
c) Las posibilidades que hacen de la gestión del mantenimiento una parte importante del plan estratégico.
d) Las herramientas de gestión disponibles para la toma de decisiones en mantenimiento.
e) Los aspectos relacionados con el diseño del sistema y la gestión del mantenimiento en el contexto de la gestión de operaciones.

f) Los elementos más importantes relacionados con el entorno de la toma de decisiones en el diseño de sistemas técnicos y el control y la gestión dinámica de su ciclo de vida.

Se realiza una revisión de la literatura publicada sobre la gestión del mantenimiento con el objeto de identificar, desde el punto de vista de los investigadores y profesionales del tema: los nichos/huecos; las tendencias emergentes en el campo de la gestión del mantenimiento; hacia dónde debe dirigirse la investigación futura. Como segunda derivada, esta revisión contribuirá también a tener identificadas y clasificadas las principales fuentes de información (autores, revistas, webs), las herramientas, modelos matemáticos, aplicaciones, casos de estudio, a los que recurrir, como complemento, a los modelos desarrollados en el presenta trabajo de tesis.

Finaza el capítulo con un apartado de contribuciones donde se exponen los factores directores para la definición y diseño de los modelos para la gestión del mantenimiento sobre una base económica.

- *Capítulo II: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M de sistemas técnicos.* Se plantea, como contribución, un nuevo modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado. Este capítulo desarrolla todo el marco de gestión en base a la estructuración del problema y los principales factores directores identificados en el capítulo anterior.

Se desarrollan los pilares claves del marco de referencia para alcanzar los máximos niveles de eficiencia y efectividad de los activos y se analiza el papel de la O&M en la rentabilidad económica de un sistema.

Atendiendo a los ejes de actuación de la función mantenimiento para la mejora de la competitividad y, de acuerdo con el *nuevo modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado* y el marco de referencia descritos, se establece el modelo conceptual para la definición y diseño de los procesos de decisión para la configuración de la STM+C (nivel 1) y la planificación y control dinámico de la O&M (nivel 2).

- *Capítulo III: Proceso de decisión para el diseño óptimo de alternativas STM+C. Metodología I + I + D.* En este capítulo, se desarrolla un proceso de decisión para el diseño, de forma estructurada y base científica**,** de alternativas STM+C. El modelo desarrollado toma como marco de referencia el de la ingeniería de sistemas y el modelo propuesto por Ogink & Al-Jibouri (2008). Está orientado hacia el ciclo de vida del sistema (en base al interés y objetivos del cliente) y estructurado sobre una metodología de toma de decisiones multietapa basada sobre los últimos avances científicos.

El modelo es de gran valor para el diseño y selección, en la fase de adquisición (nivel 1), de alternativas STM+C de sistemas tecnológicos complejos cuando los trade-off han de ser realizados sobre la base del desempeño (performance) vs. coste total.

El proceso es iterativo para facilitar una apropiada realimentación que incorpore un "refinamiento top-down" en los detalles de diseño, a nivel de sistema, subsistema y componentes, para favorecer la "convergencia fuerte"hacia la configuración óptima.

Se propone, como elementos claves del proceso de toma de decisiones para la sele - cción óptima de STM+C con objeto de garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo: el análisis de las garantías de desempeño para cada alternativa, la cons - trucción de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonus), el análisis de escalabilidad (para adaptar la evolución del sistema a las disponibilidades presu - puestarias y las demandas dinámicas del mercado) y el R- LLCA (Análisis LCC basado en el análisis de riesgos).

Las "garantías del desempeño en el funcionamiento (garantías de performance)" forman parte del proceso de decisión (en el nivel 1) y de selección de la mejor alterna - tiva. Son usadas para la mejora continua del diseño de una alternativa y para poner en

valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo de toma de decisiones basado en el riesgo desarrollado en este trabajo. Se consideran una buena forma de cuantificar económicamente la efectividad total de una alternativa.

La metodología desarrollada tiene una gran influencia sobre la reducción de los efectos diferidos (económicos, accidentes, paradas no programadas) que emergen en la fase de operación vinculados a errores, tanto de diseño como de toma de decisiones, en la fase de adquisición. Es de gran valor para el nuevo contexto de "contratos integrados".

El objetivo principal del modelo es brindar STM+C documentadas a nivel de disponibilidad, política de mantenimiento, riesgo específico, costes diferidos (penalizaciones) y coste total.

Finaliza el capítulo con un apartado de contribuciones donde se resume las principales aportaciones del modelo.

- *Capítulo IV: Proceso de decisión y plataforma científico - técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.* En este capítulo se desarrolla, para la fase de operación de la STM+C seleccionada, un sistema de información para mejorar, de forma estructurada y base científica, el grado de competencia mediante la gestión de su configuración o, su restructuración/rediseño ("nueva configuración adaptada"). El sistema de información que se propone, toma como referencia el modelo jerárquico descrito por Goldratt, E.M. (1990). Está pensado para la fase de operación de la STM+C elegida y la búsqueda de respuestas altamente optimizadas ante estímulos externos y/o internos. Uno de los objetivos básicos será comparar los efectos de varios cursos de acciones (efectos de diferentes regímenes o políticas de mantenimiento, decidir una compra o inversión, otros). Típicamente, la evaluación implicará comparar coste con valor añadido. La clave estará en evaluar la efectividad de una opción. La respuesta/salida (fenotipo optimizado) busca la "Efectividad total" del sistema.

Se define y diseña el proceso de decisión, y la plataforma científico-técnica, para el control y la gestión dinámica de la O&M. La plataforma se articula en base a procesos dinámicos (evolutivos) de ayuda a la toma de decisiones para obtener, en cada iteración(evolución), alternativas /soluciones óptima/s globales que estén correlacionadas con la evolución de los parámetros del sistema o/y las condiciones del entorno (económicas, legales, de ciclo de mercado, sociales).

Se proporcionan las directrices (no un análisis completo) para desarrollar una herramienta que brinde una información organizada del funcionamiento y ofrezca la oportunidad de controlar los efectos sobre las actuaciones realizadas para la gestión y control dinámico del ciclo de vida del sistema.

- *Capítulo V: Aplicaciones.* Una vez la metodología se ha definido, es necesario evaluar su implementación. En este capítulo se presentan tres casos reales de contratos integrados, que por su tipología, resultan idóneos para proveer una descripción detallada sobre la implementación de la metodología e ilustrar los resultados.

Los casos ofrecen un punto de vista práctico orientado a la mejora y la toma de decisiones para la gestión del mantenimiento. Permiten dar una visión del mantenimiento más amplia, no sólo desde el punto de vista del gasto que supone a nivel contable, sino también por los riesgos que minimiza y los beneficios ocultos que implica su correcta planificación y ejecución.

En el documento de la tesis, estos cinco capítulos se complementan, además, con los siguientes anexos:

- Conclusiones.
- Bibliografía.
- Glosario de términos como soporte para determinar el entorno semántico sobre el

que se construye la tesis.

- Anexos que complementan la información y técnicas presentadas.
- Congresos nacionales e internacionales en relación con la tesis.
- Artículos producidos sobre la tesis.

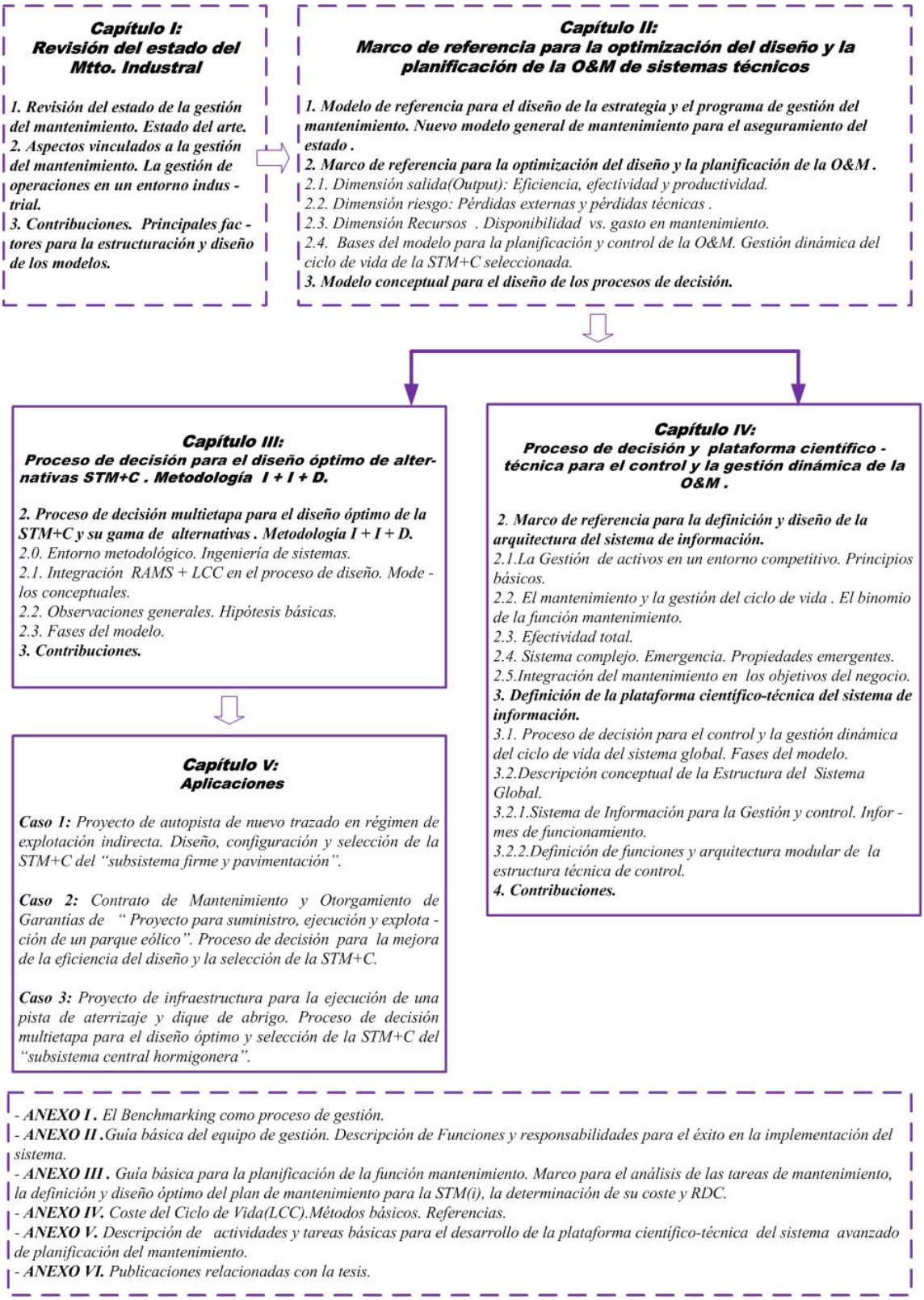


Figura 11: Estructura de la tesis doctoral.

5. CONTRIBUCIONES.

La contribución principal de esta tesis es proveer unos modelos de decisión para la mejora de la eficiencia de un sistema (a través del diseño con rigor de Soluciones Técnicas y de O&M Coste-efectivas) y la mejora de la efectividad y la productividad real neta (a través del Control y la Gestión dinámica de su configuración).

En este apartado, se recogen otras contribuciones aportadas en el presente trabajo:

- Capítulo I: Revisión del estado del mantenimiento industrial.

• Estructuración del problema a partir de la identificación, desde el punto de vista de los investigadores y profesionales del tema, de los nichos/huecos y las tendencias emergentes en el campo de la gestión del mantenimiento.

• Diagnóstico de hacia dónde debe dirigirse la investigación futura.

• Factores directores para la definición y diseño de los modelos que hagan posible la gestión del mantenimiento sobre una base económica (apartado 3).

- Capítulo II: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M de sistemas técnicos.

• Se plantea, en respuesta a la afirmación de Coetzee, J.L., 1997 a y el análisis desarrollado por la Eindhoven University of Technology (E.U.T.), un nuevo modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado en sintonía con los objetivos del negocio.

• Pilares claves del marco de referencia para alcanzar los máximos niveles de eficiencia y efectividad de los activos.

• Modelo conceptual para la definición y diseño de los procesos de decisión.

- Capítulo III: Proceso de decisión para el diseño óptimo de alternativas STM+C. Metodología I + I + D.

• Proceso de decisión multietapa para el diseño y selección, de forma estructurada y base científica, de alternativas STM+C de sistemas complejos en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total, para el ciclo de vida establecido.

• Elementos claves para garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C:

- Análisis de las garantías del desempeño.
- Ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonificaciones).
- Análisis de escalabilidad (para adaptar la evolución del sistema a las disponibilidades presupuestarias y las demandas dinámicas del mercado).
- Análisis LCC basado en el análisis de riesgos (R- LLCA).

• Guía básica (Anexo III) para la planificación óptima de la función mantenimiento, en la fase de diseño, en base al análisis de riesgo.

- Capítulo IV: Proceso de decisión y plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.

• Plan director para la definición y diseño de la plataforma científico-técnica del sistema de información.

• Sistema de información para mejorar, de forma estructurada y base científica, el grado de competencia, en la fase de operación, de la STM+C seleccionada mediante la gestión de su configuración o, su reestructuración/rediseño (“nueva configuración adaptada”).

• Guía básica del equipo de gestión. Descripción de Funciones y responsabilidades para la implementación del sistema (Anexo II).
• Proceso de decisión y plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.
• Se proporcionan las directrices (no un análisis completo) para desarrollar una herramienta que brinde una información organizada del funcionamiento y ofrezca la oportunidad de controlar los efectos sobre las actuaciones realizadas para facilitar el control y la gestión dinámica del ciclo de vida del sistema.
• Integración de la función mantenimiento con las funciones principales de negocio con objeto de obtener "óptimos globales dinámicos" a nivel organizativo.

▶ Capítulo V: Aplicaciones.

5.1. Caso 1: Proyecto de autopista de nuevo trazado en régimen de explotación indirecta. Diseño, configuración y selección de la STM+C del "subsistema firme y pavimentación".

• Comparación y discusión del resultado del proceso de selección de la mejor alternativa con el resultado cuando se consideran las garantías de desempeño (garantías de performance) en el modelo.

• Evaluación de las alternativas desde el *punto de vista de su sostenibilidad*. Dado que una carretera es una infraestructura para la sociedad ("infraestructura social"), en el análisis económico se considera clave tener en cuenta el coste de la disponibilidad del uso que tenga en cuenta el tiempo que se tarda en hacer reparaciones y mantener una instalación (downtime planificado). Se parte de la hipótesis de que es un coste importante para todos los usuarios de la vía: *coste social de indisponibilidad o de no disponibilidad.*

• Incorporación de las compensaciones como dato en el proceso de decisión a través del factor de "*sostenibilidad social*".

• Introducción del concepto de "*coste social de no disponibildad*" para referirse al coste asociado al downtime planificado en este tipo de infraestructuras.

• Demostración de que en los sistemas técnicos de producción continua e intensivos en capital, las "garantías de desempeño" (y sus ecuaciones de compensación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa. Se proponen como elemento clave que debe ser tenido en cuenta en el proceso de selección de la mejor alternativa.

• Se plantea la traducción económica del downtime como coste social de indisponibilidad a través del principio de "alquiler de carril (lane rental)".

• Se demuestra que la compensación del downtime (penalización) tiene un peso importante sobre el coste total de cada alternativa. Se propone como una buena forma de cuantificar el desempeño, la sostenibilidad social y económica y la efectividad total de una alternativa.

Este principio se utiliza para: minimizar el impacto sobre el usuario de la vía de la solución adoptada; transferir los costes diferidos al contratista (compensación negativa); obligar al contratista a valorar, a la hora del diseño de la solución, la tasa de compensación entre cerrar o alquilar un carril.

El objetivo es generar un doble efecto en el proceso de decisión en la fase de adquisición: un incentivo financiero en el contratista para minimizar el tiempo en que un carril no está en funcionamiento y una reducción del perjuicio sobre el usuario.

• El LCCA para la evaluación de las alternativas se realiza desde el punto de vista de su" sostenibilidad social" en base a lo que se ha denominado" coste social de no disponibilidad".

• Se demuestra que la alternativa de menor CAPEX no es la de menor LCC total.

• Se plantea el efecto de las bonificaciones y penalizaciones sobre el intervalo de LCC mínimo vs. proceso de decisión

• Se demuestra que un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final; también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de precisión .(Goldratt, E.M, 1990)

• Se pone en valor los beneficios de un proceso de decisión bien construido, completo y riguroso para apoyar los procesos de diseño y selección de alternativas en la fase de adquisición.

5.2. Caso 2: Contrato de Mantenimiento y Otorgamiento de Garantías de "Proyecto para suministro, ejecución y explotación de un parque eólico". Proceso de decisión para la mejora de la eficiencia del diseño y la selección de la STM+C.

• Se plantea y desarrolla un proceso de tres etapas para investigar, comparar y diseñar Soluciones Técnicas y de O&M mediante "anidamiento de óptimos".

• Formulación de las garantías y las ecuaciones de compensación negativa.

• Matriz de decisión semicuantitativa para orientar la estrategia de O&M y los aspec - tos claves en la negociación del contrato.

5.3. Caso 3: Proyecto de infraestructura para la ejecución de una pista de aterrizaje y dique de abrigo. Proceso de decisión multietapa para el diseño óptimo y selección de la STM+C del "subsistema central hormigonera".

• ***Proceso de decisión multietapa.*** La metodología está basada sobre la evolución gradual de los detalles del diseño y la componente de coste total, mediante un proceso de refinamiento multietapa, en términos funcionales, de la componente de coste total y el desempeño.

• ***"Análisis técnico relativo"de las alternativas,*** para apoyar, de forma informada, el proceso de diseño y selección del subsistema en base al desempeño y los trade-off CAPEX vs. OPEX.

La evolución de las etapas del proceso de decisión establece un "proceso dinámico de búsqueda" de la solución que obliga a una "calibración dinámica" de las diferentes alternativas para dar una respuesta eficiente en cada momento.

• Ratificación de que en sistemas técnicos de producción continua e intensivos en capital, las garantías de desempeño (y sus ecuaciones de compensación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa.

• **Se plantea** la evaluación de las alternativas introduciendo las compensaciones (positivas y negativas) en el proceso de decisión. Se establecen diferentes penalizaciones según la criticidad del downtime/fase proyecto.

Se utilizan las ecuaciones de compensación para poner en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo propuesto de toma de decisio - nes basado en el riesgo. Obligan a valorar, a la hora del diseño y configuración de la solución, la tasa de compensación.

• Cuantificación de los "Costes diferidos de producción" sobre la base de la indisponibilidad de funcionamiento del subsistema: *Ecuaciones de compensación negativa (penalizaciones downtime).*

• Se pone en valor, para la configuración del diseño de la alternativa, el efecto del mantenimiento sobre producción a través de la cuantificación económica (conse - cuencias) del downtime planificado y no planificado (RDC).

• En el LCCA se considera el coste de la indisponibilidad. Se parte de la hipótesis de que es un coste importante para todas las alternativas.

Dado la naturaleza del proyecto, la función mantenimiento necesita optimizar los niveles de prevención aplicables con objeto de optimizar la capacidad de producción disponible (mucho más crítica en la fase 2). La atención se centra en la minimización del downtime (factor de coste más significativo) y la maximización de la "disponibi - bilidad técnica" debido a su influencia positiva y directa sobre el proyecto.

- Análisis de las estructuras del CAPEX y OPEX a través de diagramas de árbol.
- Se considera la planificación coordinada del mantenimiento y su soporte logís - tico en la fase conceptual (preliminar) del diseño.

Dado que el problema de minimización del downtime es complejo, pues depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capacidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambientales, otros), el objetivo es mantener un nivel óptimo de fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo.

- Se demuestra como *opciones* encaminadas a mejorar el downtime y el comportamiento al fallo afectan al RDC y al CAPEX en el LCCA de cada alternativa.
- Se confirma que las decisiones de inversión en base al precio de compra (CAPEX) son erróneas.
- Se muestra que los Costes de Sostenimiento/Propiedad de un activo/sistema tienen un peso mayor que el precio de compra/adquisición.
- Se demuestra que la "bonificación (compensación positiva)" actúa reduciendo (restando) la componente de OPEX y desplazando hacia abajo su curva y la del coste total.
- Se confirman las dos hipótesis que surgieron en el Caso 1 asociadas a las siguientes situaciones :

1. La influencia de la compensación positiva en el trade-off LCC vs. proceso de decisión: *Coste Total* (€) = [*CAPEX + OPEX)*] – *(compensación positiva).*
2. El efecto sobre el OPEX y la curva de coste total al introducir conjuntamente compensaciones positiva y negativa a la hora de determinar el intervalo de LCC mínimo.

- Se pone en valor, para la configuración del diseño de la alternativa, una política de la función mantenimiento basada en la prevención frente a la intervención.

Se demuestra que el Mantenimiento es importante en la producción. La aplicación de técnicas y métodos correctos de mantenimiento lleva a menores costes y otras mejoras de interés.

- Se pone en valor que una estrategia orientada hacia la potenciación de los inductores de ingresos genera un efecto inducido mayor sobre la reducción de los conductores de costes. Igualmente, se muestra la importancia de la función manteni - miento como función de negocio.
- Se muestra que un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final; también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de precisión .(Goldratt,E.M,1990)
- Se demuestra que un refinamiento de los datos en el proceso multietapa de deci - sión mejora el proceso deductivo utilizado para el diseño, configuración y selección de la STM+C.

6. PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS.

Como resultado del proceso de investigación, se han producido los siguientes artículos, y conferencias que son presentados en el Anexo VI.

Congresos Nacionales e internacionales.

- ***Título:*** Sistema avanzado para la planificación del mantenimiento con un enfoque estraté - gico e integrador de aplicación a entornos industriales.
  Autores: A.L. Álamo, B. Galván, M. Méndez, G. Winter.
  Congreso: XIII Congreso de Confiabilidad. Zaragoza, España. Noviembre, 2011.

- ***Título:*** Proposition d'Aide au Choix avec des AEMO.
  Autores: M. Méndez, A.L. Álamo, M. Frutos, D. Greiner, B. Galván, G. Winter.
  Congreso: ROADEF 2013 (Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision). Troyes, France. Febrary, 2011.

- ***Título:*** Problemática *gamma* de Ordenación con Algoritmos Evolutivos MultiObjetivo y Programación Compromiso.
  Autores: M. Méndez, B. Galván, M. Frutos, A.L. Álamo.
  Congreso: IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspira – dos (MAEB2013). Madrid, España. Septiembre, 2013.

Revistas científicas internacionales *(en revisión).*

- Reliability Engineering & System Safety (Elsevier Editorial).
  Título: Influence of the performance guarantees on the best alternative selection process in the acquisition phase in DBM contracts.
  Autores: A.L. Álamo, M. Méndez, B. Galván.

- Engineering Optimization (Taylor & Francis).
  Título: A compromise solution with multi-objective evolutionary algorithms under partial user preferences.
  Autores: M. Méndez, A.L. Álamo, B. Galván, D. Greiner.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DEL ESTADO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

CAPÍTULO I: REVISIÓN DEL ESTADO DEL MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.

En este capítulo se analiza el estado del mantenimiento industrial para identificar las claves reales de su funcionamiento, las principales prácticas, las tendencias de mercado (fabricación, operación, mantenimiento), las dificultades a nivel operativo y de gestión, las herramientas de gestión disponibles, etc.

El objetivo es realizar una estructuración del problema que permita, en función de la información que emerja del análisis, identificar los principales factores sobre los que cimentar la construcción de los modelos que hagan posible la gestión del mantenimiento sobre una base económica.

Se explora:

a) El papel que juega la gestión del mantenimiento como función de negocio.
b) Los aspectos importantes en el proceso de toma de decisiones en mantenimiento.
c) Las posibilidades que hacen de la gestión del mantenimiento una parte importante del plan estratégico.
d) Las herramientas de gestión disponibles para la toma de decisiones en mantenimiento.
e) Los aspectos relacionados con el diseño del sistema y la gestión del mantenimiento en el contexto de la gestión de operaciones.
f) Los elementos más importantes relacionados con el entorno de la toma de decisiones en el diseño de sistemas técnicos y el control y la gestión dinámica de su ciclo de vida.

1. REVISIÓN DEL ESTADO DE LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. ESTADO DEL ARTE.

1.1. La evolución en el tiempo del mantenimiento.

La percepción del mantenimiento ha cambiado considerablemente a lo largo de las últimas décadas. Hasta hace 30 o 40 años, el mantenimiento era considerado como una actividad inevitable, muy especializada técnicamente, orientada a la eficiencia y de difícil control, la cual actuaba como actividad soporte de producción. Esta visión ha ido cambiando con el tiempo (figura 12), y el mantenimiento actualmente se organiza dentro de las empresas en un departamento con sus responsabilidades específicas.

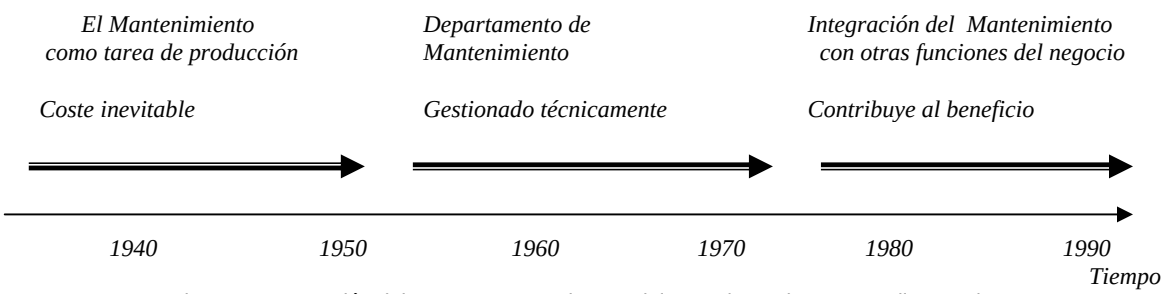


Figura 12: La gestión del MTTO. Perspectiva en el tiempo (Basado en Marcelis, 1984).

Hace tan sólo dos décadas cuando se empieza a considerar que el Mantenimiento exige no sólo cualidades técnicas, sino también de gestión, dado su interrelación con otras funciones del negocio. El mantenimiento comienza a considerarse como una parte integral del concepto de negocio. Algunos de los motivos que justifican la gestión del mantenimiento como una función clave para soportar la actividad de producción/operación son:

- El estricto control de costes impuesto por la mayor presión competitiva.
- El mayor grado de automatización, lo que exige un mayor nivel de fiabilidad de los equipos de producción.

- El creciente interés por las filosofías de producción japonesas que ponen el acento en la mejora de los procesos de producción.
- La necesidad de mejorar, de forma continua, los niveles de productividad y competitividad.
- Los ciclos de mercado.

1.2. Tendencias de futuro. Cambios organizativos y tecnológicos.

La creciente incorporación de sensores microelectrónicos en la estructura interna de los equipos ha permitido disponer, en tiempo real, de información del proceso de desgaste efectivo de una serie de piezas y componentes críticos. Este aumento de la transparencia de los procesos de desgaste ha aumentado el peso del mantenimiento condicional o predictivo.

El aumento del peso del mantenimiento predictivo y las necesidades de trabajo científico - técnico y sistemático que este genera está llevando a la creación de nuevos departamentos o subdepartamentos técnicos especializados. Esta tendencia puede contrarrestar la pérdida de funciones e importancia de los departamentos tradicionales de mantenimiento. Afecta especialmente a las empresas de procesos continuos con grandes instalaciones automatizadas y para las que el alargamiento de la vida útil de los equipos es un imperativo de primer orden. Por el tipo de funciones que deberán realizar, los "nuevos departamentos de mantenimiento" serán más parecidos a las ingenierías, las oficinas técnicas, o incluso, los departamentos de I+D. Sus funciones básicas serán:

- la realización de tareas de auditoría técnica cuando se trate de grandes instalaciones de procesos continuos,
- la fijación y descripción de procedimientos de mantenimiento,
- la definición de puntos críticos en los que deberían instalarse sensores y sistemas de auscultación con el fin de perfeccionar los procesos de mantenimiento preventivo condicional,
- la realización de históricos, el rediseño de piezas y la redefinición de geometría,
- la toma de datos y análisis estadísticos,
- la evaluación de suministradores de piezas y de empresas de mantenimiento subcontratadas, entre otras.

La evolución tecnológica de los equipos y el aumento de los niveles de automatización de la producción está conduciendo a procesos de integración organiza - tiva entre departamentos y al aumento de la polivalencia de los puestos de trabajo, principalmente a nivel de operación (TPM).

Se pretende que los operarios no especializados sean capaces de realizar labores de detección y prediagnóstico de averías, para lo cual, se están incorporando sistemas expertos para la detección rápida y precisa del origen de las averías y de otras incidencias.

La automatización de la producción no afecta directamente al mantenimiento, pero sí indirectamente, por la incorporación de tareas de preventivo a los puestos de producción donde se generan cada vez más espacios libres que se destinan a la realización de dichas tareas, como consecuencia, precisamente, del incremento del nivel de automatización.

Las tendencias de futuro van claramente hacia una sustitución del mantenimiento tradicional por un reactivo predictivo con objeto de reconciliar el control de los costes con el aumento de la flexibilidad.

Las nuevas formas de mantenimiento requerirán que las empresas tengan que realizar una inversión en "medios de trabajo de nueva generación" (aparatos de medida, oscilógrafos, ordenadores capaces de procesar datos de vibraciones y de aceite, etc.) y de automatizar la supervisión de máquinas con la ayuda de la termografía, sensores, en -

doscopia, etc. Estas herramientas permitirán, a medio plazo, introducir sistemas expertos y de simulación para automatizar una parte creciente de las operaciones del preventivo y predictivo. La informatización afectará, cada vez más, a la propia gestión de la logística y al control de los procesos de mantenimiento; abrirá la puerta a la inte - gración de la gestión del mantenimiento con otras funciones, como la compra de piezas de recambio, la gestión de almacenes, la planificación de la producción, etc.

Los cambios más significativos observados en las políticas de mantenimiento y producción pueden ser resumidos (figura 13) en los siguientes puntos:

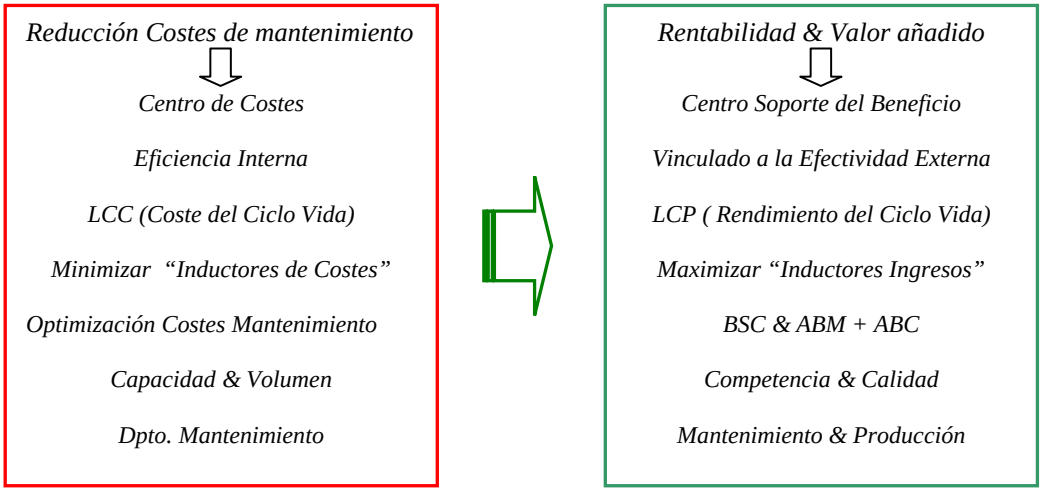


Figura 13: Desde el enfoque tradicional hacia las nuevas políticas en Mantenimiento – Producción. (Hans Ahlmann, 2002)

1.3. Estado del arte. Revisión de la literatura.

El propósito principal de este apartado es realizar una revisión de la literatura publicada sobre la gestión del mantenimiento con el objeto de identificar, desde el punto de vista de los investigadores y profesionales del tema, los nichos/huecos y las tendencias emergentes en el campo de la gestión del mantenimiento. El objetivo es contribuir a realizar una estructuración del problema que permita un diagnóstico de hacia dónde debe dirigirse la investigación futura. Se ha tomado como referencias los trabajos de Pintelon, L. (1990), Dekker, R. (1996), Garg, A. et al. (2006), Massón Guerra, J.L., et al. (2006).

Como segunda derivada, esta revisión contribuirá también a tener identificadas y clasificadas las principales fuentes de información (autores, revistas, webs), las herra - mientas, modelos matemáticos, aplicaciones, casos de estudio, a los que recurrir, como complemento, a los modelos desarrollados en el presenta trabajo de tesis.

De la bibliografía localizada cabe mencionar:

- *Patton, I.D.(1980).* Se centra en la interacción mantenimiento - fiabilidad – mante – nibilidad.
- *Mann, I. (1983).*
- *Kelly, A. (1984 a).* Ilustra los principios de la gestión del mantenimiento con casos de estudio de la industria en el Reino Unido.
- *Niebel,B. (1985).* Aborda el tema desde el punto de vista de la ingeniería industrial.
- *Narayan,V. (2004).* Se centra en la importancia del papel del mantenimiento en la minimización y gestión del riesgo en la industria.
- *Wireman, T. (2004 y 2005).*
- *González Fernández, F.J. (2005).* Trata las diferentes facetas que en la actualidad

afectan al mantenimiento industrial. Conjuga la novedad temática con un adecuado equilibrio científico - práctico en el enfoque y tratamiento de los contenidos.

- *Levitt, J. (2009).* Interesante como manual básico para reducción de costes.

Otra categoría de libros discuten sobre los modelos matemáticos para establecer po - líticas de mantenimiento óptimas. Cabe destacar, dentro de esta categoría:

- *Barlow, R.E., Proschan, F., y Hunter, I.C. (1967).*
- *Barlow, R.E., Proschan, F. (1975).*
- *Gertsbakh, I.B. (1989).*
- *Ben - Daya, M., et al. (2000).* Recoge los desarrollos más recientes en el área de la modelización y optimización del mantenimiento.
- *Rausand, M., Hoyland, A, (2004).* La segunda edición se centra más en las aplica – ciones prácticas de la teoría de la fiabilidad. Introduce dos nuevos capítulos donde se aborda el tema de la fiabilidad en sistemas mantenidos y sistemas seguros, respectiva - mente.
- *Dhillon, B.S. (2006).*
- *Crespo Márquez, A. (2007).*

Otros autores realizan una descripción general de la gestión del mantenimiento: *Armstrong (1987), Nelly (1980), Tombari (1982), Pottinger (1983), Wilkinson (1968),* entre otros.

En cuanto a la forma de diseñar y estructurar la función mantenimiento poco ha sido escrito. La bibliografía consultada muestra modelos que están más centrados en el control administrativo (administración) que en la gestión. Entre los autores que ponen más énfasis en los modelos de gestión, cabe destacar:

- *Alcaly, J.A. y Buffa, E.S. (1973).* Plantea un modelo que integra producción – man - nimiento que va más allá de los modelos puramente administrativos. Sin embargo, no incluye todos los aspectos relacionados con la gestión del mantenimiento.
- *Blegen, H.M., y Nylehn, B. (1968).* Lista una serie de hipótesis que relacionan la e - fectividad del mantenimiento con las decisiones de producción y suministra una serie de ideas que muestran la interacción entre producción y la gestión del mantenimiento. El énfasis se pone sobre los aspectos técnicos. Los aspectos relacionados con la estructura y organización no son considerados.

La revisión de artículos se ha realizado tomando como referencia el trabajo y la clasificación propuesta por Garg, A. et al. (2006). Analiza un total de 142 artículos y los clasifica en seis áreas, las cuales, a su vez, se dividen en subáreas. Esta clasificación es de notable interés porque cada área tiene méritos propios para una investigación separada. En las tablas 1 a 9 se recogen los resultados de la evolución en el tiempo y la clasificación de artículos por áreas y subáreas:

Tabla 1: Clasificación de artículos por áreas de investigación (Garg, A. et al., 2006).

Área	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total área*
(A1) *Modelos de Optimización.*	*1(1992)*	*-*	*-*	*1*	*3*	*2*	*4*	*2*	*6*	*5*	*3*	*27*
(A2) *Técnicas de Mtto.*	*-*	*-*	*2*	*3*	*4*	*6*	*5*	*15*	*9*	*8*	*6*	*58*
(A3)*Programación del Mtto.*	*-*	*-*	*-*	*-*	*-*	*1*	*2*	*2*	*2*	*1*	*1*	*9*
(A4) *Medidas del Performance.*	*-*	*2*	*1*	*2*	*3*	*3*	*1*	*3*	*1*	*4*	*3*	*23*
(A5) *Sistemas de Información.*	*-*	*-*	*1*	*-*	*-*	*3*	*-*	*-*	*1*	*-*	*1*	*6*
(A6) *Políticas de Mtto.*	*1(1992)*	*-*	*1*	*1*	*2*	*1*	*1*	*4*	*5*	*1*	*2*	*19*
Total por año	*2*	*2*	*5*	*7*	*12*	*16*	*13*	*26*	*24*	*19*	*16*	*142*

(A1) Modelos de optimización del mantenimiento.

Básicamente, un modelo de optimización del mantenimiento es un modelo matemá - tico que cuantifica el coste vs. beneficio del mantenimiento y permite establecer un balance óptimo entre ambos en base a diferentes restricciones. En general, los modelos de optimización cubren cuatro aspectos:

1) Descripción técnica del sistema, su función e importancia.
2) Modelización del deterioro del sistema en el tiempo y las posibles consecuencias para este.
3) Descripción de la información disponible de un sistema y las posibilidades abiertas para gestionarlo.
4) Una función objetivo y una técnica de optimización que ayuda a la búsqueda de la mejor solución.

Los modelos encontrados se pueden clasificar, en base a la modelización del deterioro, como deterministas o estocásticos. Modelos recientes permiten establecer una subclasificación en modelos estocásticos bajo riesgo o garantía (Sherif & Smith, 1982).

Dekker y Scarf (1998) presentan otra clasificación de modelos en tres áreas: modelos de reemplazamiento (en bloque o por edad); modelos de decisión de Markov; modelos de tiempo de retardo. Además, analizan 112 artículos con aplicaciones y clasificados con otros criterios.

Otras revisiones pueden ser consultadas en Pierskala & Voelker (1979), Bosch y Jensen (1983), Sherif (1981), Valdez-Flores & Feldman (1989), Cho y Parlar (1991), Dekker, R. (1996).

Tabla 2. Clasificación de artículos por subáreas “A1: Modelos de optimización”. (Garg, A. et al., 2006).

Área 1: *Modelos.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A1.1) Bayesiano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	2
(A1.2) MILP. Program. Lineal Entera Mixta.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
(A1.3) MCDM. Toma de Decisiones Multicriterio.	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	2
(A1.4)Fuzzy Linguis tic.	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	-	2
(A1.5)Procesamiento de la información: Método Galbraith.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
(A1.6) MAIC Matrially per Appare cchiature de Imperiti Chemiei.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
(A1.7) Simulación.	1(1992)	-	-	-	-	-	1	-	2	-	-	4
(A1.8) Modelo de degradación Marko - viano.	-	-	-	-	-	1	-	1	2	-	-	4
(A1.9)AHP Analytic Hierarchy Process.	-	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	2
(A1.10)Redes de Petri.	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
(A1.11) Modeliza - ción organización mtto(Terotecnología, TQM/TPM/RCM, ANN,...)	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	2
(A1.12)Misceláneos	-	-	-	-	2	-	1	-	1	-	1	5
Total por año	1	0	0	1	3	2	4	2	6	5	3	27

El aumento del número de publicaciones en los últimos 5 años se ha visto favorecido por el desarrollo IT (a nivel de soft y de hard) y la reducción de sus precios.

(A2) Técnicas de mantenimiento.

En esta área existe una profusión de artículos publicados, observándose que los relacionados con la mantecnología se distribuyen de forma más uniforme a lo largo del tiempo, mientras que los relacionados con técnicas de organización del mantenimiento comienzan a aparecer entorno al 2000.

En el subárea de PM (Mantenimiento Preventivo) existe un amplio número de trabajos en los que se utilizan diferentes modelos matemáticos (Bayesiano, Markov, estocásti - cos, entre otros) y simulación (Monte Carlo, algoritmos genéticos, otros) para optimi - zar las planes de preventivo para diferentes tipos de sistemas y en situaciones de producción y operación diferentes. El número de artículos publicados en el subárea del CBM (Mantenimiento Basado en la Condición) no es tan amplio, observándose que son más recientes. Se introduce diferente modelización matemática para la optimización de las políticas de inspección/reemplazamiento.

Sin embargo, llama la atención que siendo estas dos subáreas en las que existe el mayor número de artículos, no existen muchas aplicaciones publicadas.

Los artículos relacionados con las técnicas cualitativas/organizativas (TPM, RCM, CMMS) se centran en los aspectos teóricos para su implementación o en la descripción de algunas experiencias prácticas.

Otra serie de artículos presentan nuevas técnicas (ECM, SMM, RBM) que emergen de las deficiencias observadas en la aplicación del RCM y TPM y la evolución del mantenimiento para adaptarse a las nuevas condiciones de operación. Se centran en un enfoque estratégico y multidisciplinar "semicuantitativo"del mantenimiento e implican modelos matemáticos que integran aspectos técnicos, comerciales y operativos.

Tabla 3. Clasificación de artículos por subáreas "A2: Técnicas de mantenimiento". (Garg, A. et al., 2006).

Área 2: *Técnicas.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A2.1) PM Mtto. Preventivo	-	-	-	1	1	1	2	5	4	4	3	21
(A2.2) CBM. Mtto. Basado en la Condición.	-	-	-	-	-	2	-	1	-	2	1	6
(A2.3) TPM. Mtto. Productivo Total.	-	-	-	-	-	1	2	7	-	-	1	11
(A2.4)CMMS Sistema Compute- rizado de Gestión del Mtto.	-	-	2	1	1	1	-	1	1	-	-	7
(A2.5) RCM Mtto. Centrado en la Fiabilidad.	-	-	-	-	1	-	1	1	2	-	-	5
(A2.6) Mtto.Predic tivo.	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	2
(A2.7)Subcontra – tación.	-	-	-	1	-	1	-	-	-	-	1	3
(A2.8) ECM Mtto. Centrado en la Efectividad.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
(A2.9) SMM Gestión Estratégi- ca del Mtto.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
(A2.10) RBM Mtto. Basado en el Riesgo.	-	-	-	-	-		-	-	1	-	-	1
Total por año	0	0	2	3	4	6	5	15	9	8	6	58

(A3) Programación del mantenimiento.

La programación del mantenimiento es una actividad compleja debido, fundamen - talmente, a la naturaleza estocástica y dinámica de los trabajos de mantenimiento y la interrelación con producción (figura 14):

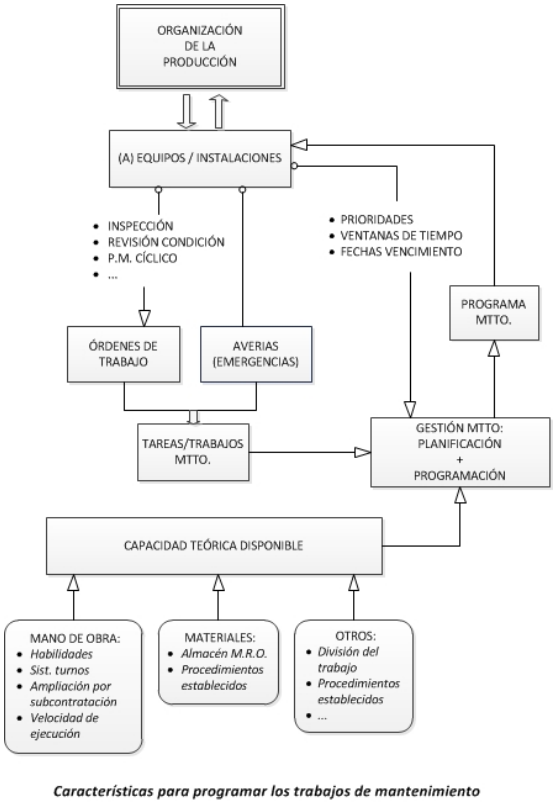


Figura 14: Interrelación mantenimiento-producción. Base para la programación del mantenimiento.

La dimensión del problema es amplia, dado que implica:

- Fijar la secuencia en la cual las órdenes de trabajo emitidas serán realizadas.
- Asignar el personal para ejecutar los trabajos.
- Establecer el momento en que las órdenes de trabajo han de ser iniciadas (tempo – rización).

A la hora de programar, a su vez, ha de tenerse en cuenta los siguientes factores:

- La prioridad de los trabajos. Definición de criterios (trade off y objetivos).
- La disponibilidad de materiales: repuestos, herramientas, etc.
- La disponibilidad del personal: especializado y no especializado, subcontratación.
- Las “ventanas de tiempo”y condiciones establecidas por producción para ejecutar los trabajos.

Una buena programación favorece la fiabilidad y disponibilidad deseada de los equipos y el uso económico de los recursos. A diferencia de la programación de la producción, la programación del mantenimiento puede quedar desfasada tan pronto surja una orden de trabajo urgente. Esto hace de la programación del mantenimiento un campo estimulante con méritos propios para constituirse en un área separada de investigación.

El problema de la planificación del mantenimiento es mencionado en la mayoría de los libros de gestión del mantenimiento. Sin embargo, el análisis se realiza sobre dos ejes básicos:

1.- Un listado de todos los datos que resultan indispensables para una buena planificación.
2.- Describir el flujo de información, a nivel organizacional, que debe acompañar a una orden de trabajo de mantenimiento desde que se solicita hasta que se ejecuta.

En la tabla 4 se recogen los resultados de la evolución en el tiempo y la clasifica - ción de artículos para esta área:

Tabla 4. Clasificación de artículos por subáreas "A3: Programación del mantenimiento". (Garg, A. et al., 2006).

Área 3: *Programc.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A3.1) Técnicas:												*5*
(A3.1.1)CBM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*	*1*	
(A3.1.2)Predictivo	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	
(A3.1.3) Preventi – vo.	-	-	-	-	-	-	*1*	*1*	-	-	-	
(A3.2) Wear out components.	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	*1*
(A3.3)Actividades modificación del ratio de repara - ción.	-	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	*1*
(A3.4) Combina - ción Producción y Mtto.	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	*1*
(A3.5) Personal.	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	*1*
Total por año		*0*	*0*	*0*	*0*	*1*	*2*	*2*	*2*	*1*	*1*	*9*

Determinados aspectos hacen el problema de programación del mantenimiento más complejo que una programación de la producción. Destacan:

- La dimensión del problema (número de trabajos en la programación semanal y número de trabajadores de mantenimiento). Por ejemplo, un programa semanal tipo para una compañía de mediana dimensión puede llevar asociado varios cientos de trabajos y varias decenas de trabajadores. Este aspecto está vinculado con el problema complejo del backlog.
- El carácter dinámico y estocástico del problema, debido a la incertidumbre asociada a los tiempos de ejecución de los trabajos y el carácter inesperado de las averías. No es lo mismo localizar una avería en una máquina y arreglarla que realizar la siguiente operación dentro de un proceso de producción perfectamente definido.
- Los criterios de rendimiento/funcionamiento considerados para la programación. A menudo, estos criterios, al no estar consensuados, son confusos y suelen entrar en conflicto con producción.
- El sistema de priorización de los trabajos (importantes, críticos y poco urgentes). El número de trabajos urgentes en los cuales el programa establecido ha de ser cambiado es mayor en mantenimiento (averías aleatorias) que en producción (órdenes urgentes).
- La disponibilidad de los equipos para actuaciones de mantenimiento (subordinada a las condiciones establecidas por producción). La mayoría de las actuaciones de mante - nimiento han de realizarse cuando los equipos están en condición de parada. A veces, las condiciones impuestas por producción son demasiada estrictas para permitir una programación razonable del mantenimiento.
- La información soporte de la decisión (disponibilidad de repuestos, especificacio – nes, estado de las órdenes de trabajo, etc.).

Lo anteriormente señalado dificulta la posibilidad de programar de forma eficiente sin la ayuda de herramientas de apoyo a la toma de decisiones. Otra complicación

añadida son los aspectos dinámico y estocástico del problema. Ello obliga a que el método de programación, para que sea eficaz, ha de ser flexible e interactivo.

Los aspectos referenciados dificultan la posibilidad de brindar una solución "ópti - ma", o al menos "aceptable para producción", al problema de la programación.

Existe la necesidad de desarrollar "técnicas adaptadas"que ayuden a estructurar y soportar la toma de decisiones en la programación del mantenimiento.

Son pocos los artículos que se centran en el problema de la programación.

En la tabla 5 se recogen las conclusiones principales del trabajo de Pintelon, L. (1990):

Tabla 5: Programación del mantenimiento. Principales conclusiones del trabajo de Pintelon, L. (1990).

Característica	***Literatura (Bibliografía, artículos,…)***
1.- Por área temática.	
Desarrollo de un sistema de ayuda a priorizar los trabajos de mantenimiento.	*Dhavale,D.G. y Otterson, G.L.(1980), Mann,L.(1983a), Wilkilson, J.J. y Lowe,J.J. (1971), French,S.(1982).*
Programación en un entorno CBM.	*Dieulle et al.(2003) , Grall et al.(2002) y Tsang et al.(2006).*
Programación del PM.	*Gopalakrishnan et al.(2001) y Greenwood and Gupta(2000).*
Estudios de casos donde se establecen algunas reglas para la programación en entornos dinámicos.	*Enscore, E.E. y Burns D.L. (1983), Worral, B.M. y Mert,B.(1980).*
Integración de la programación del mtto. y MRP.	*Ozatalay,S. (1983).*
Programación combinada producción – mantenimiento.	*Sloan and Shanthikumar(2000)*
Programación del mantenimiento a través del análisis de redes.	*Mann,L. y Bostock, H.H. ,(1983b). Válido para proble - mas de reducida dimensión con pocos trabajos de mtto.*
Formulación matemática del problema de la programa ción del mantenimiento (programación lineal o entera).	*Wagner,H.M., Giglio,R.J. y Glaser,R.G., (1964). Interesante para la planificación de proyectos con trabajos con subtareas.*
Uso de la Inteligencia Artificial (I.A.) en la programación del mantenimiento.	*Grant,T.J.,1986.*
Procedimiento para equilibrar las cargas de trabajo de los equipos de mantenimiento	*Zaloom, V.A.,1982.* *Establece un procedimiento automatizado para definir las fronteras de las áreas de trabajo para las operaciones de mantenimiento de las instalaciones de las Fuerzas Aéreas para asignar áreas geográficas a los equipos equilibrando las cargas de trabajo.*
Programación del personal de mantenimiento a través de modelos de programación estocásticos.	*Duffuaa and Al – Sultan(1999)*
2.- Sistemas para priorizar las tareas de mantenimiento.	
Fuente	***Característica del sistema de prioridad***
Práctica (sector industrial):	
Lacroix, P. y Poot,D.(1986).Fábrica de cervezas(Tesis doctoral)	*Desarrolla una fórmula compleja que combina una parte estática, en primer lugar, sobre la base de los tiempos "permitidos"; y otra dinámica, función de los tiempos de espera. El método utilizado es de ensayo y error.*
Hellewaut,D. y Verhelst,H. (1987).Fábrica de bebidas(Tesis doctoral)	*Solamente prioriza los trabajos de P.M. cíclicos. Se basa en los tiempos de intervención entre mantenimiento.*
De Quidt y Rousere,F.(1990).Industria de Procesos Químicos.(Tesis doctoral)	*La parte estática se establece en función del nivel de criticidad de la máquina. La parte dinámica en función del aumento lineal del tiempo. El total debe ser menor o igual al límite más alto.*
Bauters,W. y Bevers,B.(1990). Industria de Procesos Químicos.(Tesis doctoral)	*La parte estática se establece en función del nivel de criticidad de la máquina.*
Mabini,M.C.(1988).Programación del mantenimiento para una universidad. (Tesis doctoral)	*Peso medio de la urgencia de las tareas (estático), localización del trabajo (estático) y tiempo de espera (dinámico).*
Literatura (Bibliografía, artículos,…)	***Característica del sistema de prioridad***
Wilkinson,J.L. y Lowe,J.J. A Computerized Information System that Works. Plant Engineering,Vol.25, May 13,1977, pp 68-100	*La prioridad estática se establece como producto del tipo de equipo y las clases de tareas.*
Mann, L. y Bostock, H.H. Short Range Maintenance Planning/Scheduding Using Network Analysis, Hydrocarbon Processing, Vol. 63,marzo 1983 b, pp 97-101.	*La prioridad estática se establece en función primero de los tiempos "permitidos".*

Worral,B.M. y Mert,B.. Application of Dynamic Scheduding Rules in Maintenance Planning and Scheduding, International Journal of Production Research, Vol. 18, 1980, pp 55-71.	*Establece un conjunto de reglas estáticas, comparables con las de Mann.*
Enscore, E.E. y Burns, D.L. Dynamic Scheduling of a Preventive Maintenance Programme, International Journal of Production Research, Vol. 21,1983, pp 357-368.	*Prioriza los trabajos preventivos sobre la base de la naturaleza de la tarea, tipo de equipo, y un factor de procedimiento (periodicidad de la tarea).*
Dhavale,D.G. y Otterson, G.L.. Maintenance by Priority, Industrial Engineering, Vol.12, Feb. 1980, pp 24-27	*Sistema de ordenación usando un MCI (índice de criticidad de la máquina), calculado como el peso medio de factores vinculados a producción y mantenimiento.*
Ozatalay,S.. MRP and Maintenace Scheduling, Apics Conference Proceeding, 1983, pp 475-479.	*Utiliza el modelo de Dhavale para establecer algunas reglas descriptivas con objeto de integrar la programación del mantenimiento en un entorno MRP.*
3.- Algoritmos de programación del mantenimiento.	
▪ ***Técnicas en programación. Modos de abordar la programación***	***Característica***
Baker (1974) y French (1982).	*Suministran una buena introducción a la programación en producción.*
Coffman (1976)	*Brinda una orientación algo más matemática.*
Graves(1981) y Lawler (1989),	*Dan una visión del "estado del arte" en la investigación en programación y suministran una extensa lista de referencias.*
Lawler y Pinedo(en Dempster (1981))	*Describen las actividades de investigación en la programación determinista y estocástica, respectivamente.*
Lenstra (en O'hEigearhtaigh, (1985))	*Suministra una relación bibliográfica, comentada, en programación.*
Blackstone(1982), Melnyck(1986) y Panwalker (1977).	*Realizan un estudio de las reglas de programación y expedición (despacho) clasificadas desde diferentes puntos de vista.*
Garey, (1979)	*Una sola etapa (paso), idéntico al problema de procesadores en paralelo. Todos los trabajos requieren de un paso simple de procesamiento, el cual puede ser realizado por cualquiera de los procesadores. En el caso del mantenimiento, los procesadores son identificados con trabajadores de las mismas capacidades o el equipo*
Bradley,1975; Dogramaci,1984; Gupta,1987; Gusfield,1984; Schmidt,1988; Simons,1982.	*Procesadores no idénticos.*
▪ ***Planificación y programación de itinerarios.***	***Característica***
Bodin (1983),Geuens (1987) y Lawler (1985).	*Ofrecen información bien estructurada sobre esta clase de problemas.*
Garey,1979	*Problemas de ruta NP- hard (Nondeterministic polyno - mial time).*
Beasley, 1984; Cook,1978; Desrosiers,1983; Golden,1979; Russell,1978; Steward,1983; Waters,1987.	*Estudian las necesidades computacionales.*
Agnihothri, 1987 (estudio compañía de gas);Bertsimas, 1989 (el problema de la dinámica del reparador viajante); Balas,1988 (El problema del viajante de comercio).	*Determinación del itinerario óptimo y la programación correspondiente del personal de reparación en campo.*
▪ ***Programación de recursos simultáneos. (Programación simultánea producción-mtto.: programación en paralelo)***	***Característica***
Dobson (1986) y (1988), Honig (1989) y Johnson (1989)	*Presentan aproximaciones a la solución.*
▪ ***Otros enfoques.***	***Característica***
Baskett, 1975; Gross, 1985; Kleinrock, 1976; Lazowska, 1984; Tijms,1986.	*Aplicación de la Teoría de colas a la solución de pro - blemas de programación del mantenimiento.*
Dudzinski,1987; Elmaghraby,1980; Pirkul,1987; Martello,1980 y 1988	*Método de la mochila.*
Coffman,1978; Ross,1975; artículo revisado por Cattrysse y Van Wassenhove,1989 y la simulación de Kirkpatrick,1983	*Métodos iterados de optimización con base heurística de asignación (greedy heuristic).*
Dijkstra (1990)	*Describe un Sistema de Soporte a la Decisión (DSS) para planificar la capacidad del personal de mantenimiento en aeronaves, el cual puede ser adaptado para el sector industrial.*

(A4) Medidas del desempeño (performance) del mantenimiento.

Recibir retroalimentación sobre el funcionamiento es esencial para la gestión de cualquier función del negocio; por tanto, también para la Gestión del Mantenimiento, la cual representa una de las funciones claves para soportar la Gestión de Operaciones dentro del marco de la *O&M.*

Lo que no puede ser medido no puede ser gestionado de modo efectivo. La selección rigurosa de un sistema apropiado de *"Indicadores Claves de Funciona - miento" (KPI´s)* permite resumir (agregar) en unos pocos *"números claves (indicado - res)"*una larga cantidad de datos. Estos sistemas suelen ser una de las soluciones al problema planteado. Nuevos artículos relacionados con OR/MS han mostrado un renovado interés en los PI´s atribuyéndole beneficios adicionales más allá del brindado por los convencionales ratios que sólo informaban del funcionamiento pasado.

En la práctica, la mayoría de los gestores encargados del mantenimiento sienten la necesidad de disponer de una buena herramienta que permita elaborar informes de funcionamiento que le apoyen en la toma de decisiones como elemento de gran valor añadido.

La revisión de la literatura realizada por Garg, A. et al. (2006) identifica:

(a) diferentes técnicas de medida del desempeño(performance): indicadores, núme – ros de referencia, inspección, modelos elaborados como el de Hibi, Luck o el MMT (Herramientas para la gestión del Mantenimiento), etc. Este último modelo se presenta con casos de estudio y se le considera como más proactivo frente a otros enfoques.

Enfoques de medida del desempeño (performance) del mantenimiento cubiertos con detalle son, por ejemplo:

- *la "Medida del desempeño (performance) basada en el valor"*. Evalúa el impacto de las actividades de mantenimiento sobre el valor futuro de los activos involucrado.
- *El enfoque holístico alternativo brindado por el BSC.*
- *la Auditoría de sistema.*
- *El DEA (Análisis de los datos implicados).* Este enfoque resulta apropiado para comparar cuantitativamente la eficiencia operativa de diferentes organizaciones.

Por su enfoque global y estratégico, la aplicación del BSC para la gestión del performance del mantenimiento es considerada un área potencial de investigación. Por este motivo, se realiza una revisión más detallada de la literatura relacionada.

(b) Diferentes modelos/técnicas utilizados para obtener un Sistema de Medida del Performance (PMS): el modelo VMS (Mantenimiento Basado en la Vibración) desarro llado por Al-Najjar y Alsyouf (2004) como parte de la técnica del CBM; el uso de la técnica QFD para obtener nuevos sistema PMS (Kutucuoglu et al., 2001); uso de un MMIS (Arts et al., 1998); uso del TMM (Gestión del Mantenimiento Total); otros.

(c) Diferentes trabajos sobre OEE (Overall Equipment/ craft effectiveness).

(d) Trabajos donde se analiza la relación desempeño - estrategia de mantenimien- to (Swanson, 2001; Pintelon, et al., 2006; Pongpech et al., 2006)*; mantenimiento – efectos sobre operación* (Croker, 1999).

(e) Misceláneos. Artículos donde se estudian temas de diferente tipo como: máqui- nas herramientas (Aronson, 2002);software para el mantenimiento (Bandi et al., 2003); otros.

En la tabla 6 se recogen los resultados de la evolución en el tiempo y la clasi - ficación de artículos para esta área:

Tabla 6. Clasificación de artículos por subáreas "A4: Medidas del Desempeño". (Garg A. et al., 2006).

Área 4: *Medidas del Performance.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A4.1) Técnicas:												*11*
(A4.1.1)Varios modelos.	-	-	-	*1*	-	*1*	-	-	-	-	-	*2*
(A4.1.2)VBM Mtto. Basado en la Vibración.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*	*1*
(A4.1.3) BSC Cuadro de Mando Integral.	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	*1*	-	*2*
(A4.1.4)QFD Despliegue Funciones de Calidad.	-	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	*1*
Continuación Tabla 5	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A4.1.5) TMM Gestión del Mtto. Total.	-	*1*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*
(A4.1.6) MIS Sistema Información Mtto.	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	-	*1*
(A4.1.7) Auditoría del sistema.	-	*1*	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	*2*
(A4.1.8) Índices de Productividad del Mtto (IPM).	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	*1*
(A4.2) OEE Efectividad Total Equipo/Plantilla.	-	-	-	-	*1*	-	-	*1*	-	*2*	-	*4*
(A4.3)Relacionados con la estrategia en Mtto.	-	-	-	-	-	-	-	*1*	-	-	*2*	*3*
(A4.4)Efectos del fallo sobre la efecvidad	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	*1*
(A4.5) Misceláneos			*1*	*1*					*1*	*1*		*4*
Total por año	*0*	*2*	*1*	*2*	*3*	*3*	*1*	*3*	*1*	*4*	*3*	*23*

En la tabla 7 se resume la bibliografía y las conclusiones principales del trabajo de Pintelon, L. (1990):

Tabla 7: Resumen bibliografía (Pintelon, L., 1990).

TIPO DE SISTEMA PI	*REFERENCIAS*
Aspectos específicos de los PI´s	*-Armitage (1968) y Schmidt (1988) intentan dar una descripción general de los PI´s en mantenimiento.* *-Finley (1985), describe cómo utilizar las hojas de cálculo para elaborar los informes.* *-Monden (1985) y Hibi (capítulo 3, 1977), discuten la visión japonesa de los PI´s en mantenimiento.*
Check- list e Investigación PI´s	*- DGS (1987) y Vries Robbé (1984), son ejemplos típicos de los checklist utilizados por los consultores en mantenimiento para analizar rápidamente el funcionamiento de sus clientes.* *-Buttery (1978) y Nakajima (1982), ilustran el tipo de indicadores encontrados en la investigación macroeco - nómica para sectores industriales específicos.*
	Continúa próxima página...

Grupos de PI: - *nivel de gestión/frecuencia* - *aspectos de la gestión mtto.* - *Cuadro de control elemental*	*- Los PI´s mencionados por los diferentes autores son muy similares, y a menudo, poca información se ofrece sobre cómo deben ser usados, excepto para indicar alguna sugerencia a nivel de gestión (Mann, 1983) o para indicar la frecuencia de los informes (Método Nippon Denson- Hibi, 1977, sección 3.2).La mayoría de los PI´s son ratios y algunos de ellos relacionan datos de mantenimiento con datos externos tales como el valor de sustitución de equipos.* *-Niebel(1985) y Newbrough (1967), se encuentran dentro del grupo de autores que intentan agrupar PI´s con objeto de obtener una idea más general del funcionamiento global del departamento de mantenimiento. El grupo de PI´s está constituido por indicadores de coste de mantenimiento, gestión de órdenes de trabajo, personal y funcionamiento de equipo.* *-Priel (1962) y Noiret (1978), utilizan un enfoque más integrado e intentan construir un cuadro de control elemental con varios grupos de indicadores.*
PI´s global: - *Indicador único* - *Sistema integrado*	*- Corder (1962) y Hibi (1977), realizan otros intentos de brindar una visión más global del funcionamiento del mantenimiento. Corder, propone evaluar el funcio - namiento global del mantenimiento con un indicador bastante burdo, según la opinión de otros autores, como Pintelon, 1990. Hibi, intenta combinar las medidas de eficiencia en dos indicadores: un PI corto y otro PI largo. La evolución con el tiempo a largo plazo es dibujada gráficamente. La experiencia demuestra que el método de Hibi es demasiado rígido como para poder ser utilizado en la práctica. El motivo es que exige demasiada información detallada para el cálculo de los dos PI´s y cualquier pérdida de datos (lo cual no es infrecuente en la práctica) hace inviable obtener un resultado realista.*
Representación gráfica: - *Gráficos multifactor* - *Perfil multi-index*	*- Luck (1956), dibuja cuatro gráficos multifactor (planifi cación, carga de trabajo, coste, productividad) los cuales combina dentro de un único gráfico global multifactor .* *- Newbrough (1967) y Niebel (1985), desarrollan la misma idea. Proponen un perfil multi-index que recoja la evolución de algunos de los más relevantes PI´s.*

- ***Revisión de la literatura científica acerca de la utilización del BSC.***

En las últimas décadas del siglo XX las empresas han abandonado el sistema de competencia de la era industrial para entrar en la nueva era de la información, donde las compañías ya no pueden obtener una ventaja competitiva sostenible únicamente con la aplicación de las nuevas tecnologías a sus bienes físicos, sino que además, requieren nuevas capacidades para ser competitivas (Kaplan y Norton, 1996b).

Este cambio de contexto ha provocado el debate sobre la importancia de desarrollar mejores sistemas de medición empresarial que permitan, por un lado, tener una comprensión más dinámica e integral de los negocios; y por otro, acelerar los procesos gerenciales.

Para resolver estas situaciones se han desarrollado metodologías y sistemas comple - jos que tratan de integrar y medir los posibles generadores de valor en las empresas enfatizando, de forma especial, el potencial de los activos intangibles y su interacción con el resto de los recursos empresariales. En tal sentido, el Balance Scorecard (Cuadro de Mando Integral- CMI, en español) introduce una combinación de medidas financieras y no financiera que traducen la visión y estrategia de la organización en objetivos e iniciativas cuantificables (Kaplan y Norton, 2000). Esta herramienta surgió porque los modelos de desempeño tradicionales, que dependían fundamentalmente de las valoraciones de la contabilidad, no explicaban el impacto que tenían los activos intangibles en el rendimiento de la empresa, especialmente en aquellas en las que existía una fuerte intensidad tecnológica.

Este sistema se desmarca de los sistemas tradicionales de planificación, control gerencial y medición de resultados al considerar el alineamiento como una de las claves del éxito en su implementación, tal y como se observa en la evidencia empírica (Kaplan y Norton, 2006).

En la trayectoria evolutiva del BSC, como herramienta de dirección y gestión empresarial, se pueden distinguir cuatro etapas o generaciones diferenciadas:

(f) Primera etapa: se centra en el desempeño de la empresa (performance), en el sentido de establecer distintos indicadores que permitan medir su alcance.

(g) Segunda etapa: trata de incluir la visión estratégica en el conjunto de indicado - res.

(h) Tercera etapa: se unifican los objetivos con los indicadores a través de una re - lación causa – efecto y se establecen los mapas estratégicos.

(i) Cuarta etapa: se contempla el alineamiento estratégico.

Massón Guerra, J. L., et al. , 2006 realizan una revisión histórica de la evolución conceptual y de las aplicaciones del BSC mediante la exploración descriptiva de algunas bases de datos de artículos científicos con los siguientes objetivos:

- Realizar una evolución de la calidad de las investigaciones relacionadas con el BSC.
- Comprender las implicaciones teóricas y los avances realizados en el tema.
- Revisar la evolución teórica y empírica y las tendencias actuales.
- Determinar las líneas futuras de aplicación e investigación; particularmente, aque- llas que vinculan la estrategia con el desempeño empresarial.

Las figuras 15,16 y 17 muestran los resultados de la investigación según:

- *Campo temático.*

La figura 15 muestra que el 50% de las publicaciones están centradas en el tema del desempeño (performance), siguiéndole el de Formulación estratégica. Se observa como áreas emergentes los Mapas estratégicos y el Alineamiento.

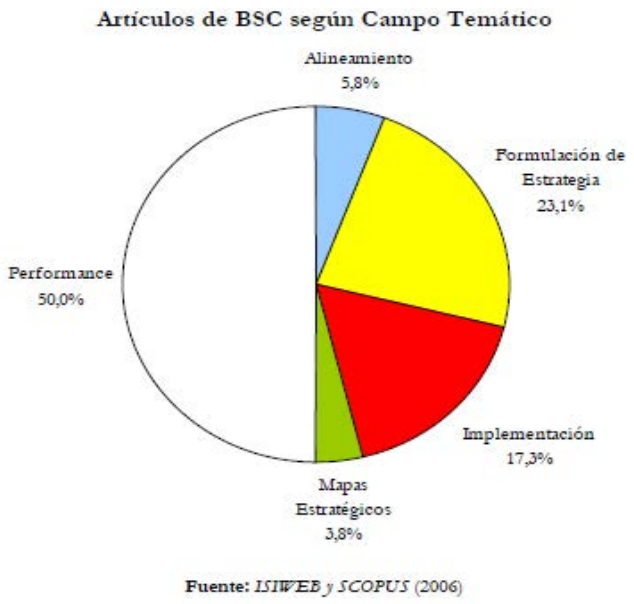


Figura 15: Distribución artículos científicos por Campos Temáticos (Massón Guerra, J. L., et al., 2006).

- *Áreas de Aplicación.*

Según esta clasificación, un 53,9% de los trabajos están vinculados a las áreas de Dirección General y Dirección Estratégica (figura 16), lo que revela la predilección en términos de usuarios (Alta dirección):

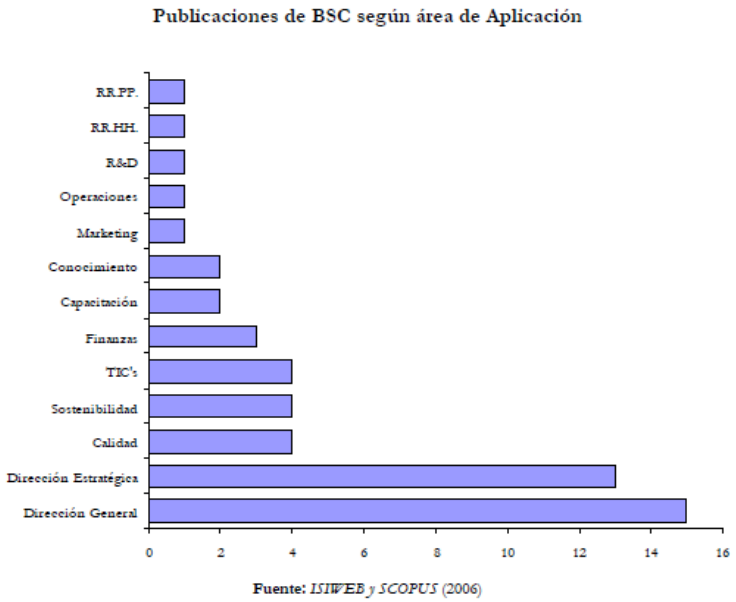


Figura 16: Distribución artículos científicos por Áreas de Aplicación (Massón Guerra, J. L., et al., 2006).

- *Unidad de Análisis.*

Según esta clasificación, la mayoría de los trabajos se concentran en empresas (46,2%),Corporaciones (23.1%) y PYMES (3,8%). El resto, (26,9%) indica que el cam - po de aplicación se ha ampliado en los últimos 14 años (figura 17).

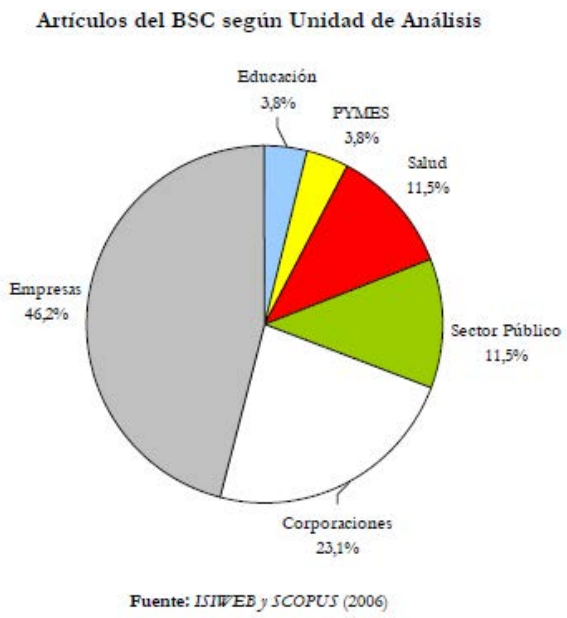


Figura 17: Distribución artículos científicos por Unidad de Análisis (Massón Guerra, J. L., et al., 2006).

Las principales conclusiones del estudio son:

- La revisión de la literatura refuerza el uso a favor y progresivo de esta herramienta.
- El BSC se ha convertido prácticamente en el estándar de la dirección estratégica, al punto de que destacadas empresas dedicadas al desarrollo de soluciones tecnológicas recomiendan su utilización (SAP, Micorosoft).
- Su enfoque ha ido evolucionando con el tiempo aumentando su campo de actuación y el número de dimensiones a considerar.

Las principales líneas de investigación propuestas son:

- Las líneas de investigación recomendadas por Kaplan giran entorno a los siguien – tes tópicos: cómo hacer partícipes a las personas del proceso de BSC, las relaciones causa - efecto de los Mapas Estratégicos, cómo lograr el compromiso de la gerencia para el éxito de la implementación del BSC.
- Necesidad de más investigación analítica y empírica de cómo alinear los recursos y las personas para la implementación del BSC mediante la coordinación y la comunica - ción.
- Otro campo de investigación propuesto por los autores está relacionado con el siste- ma de incentivos, el cual no debería sólo considerar indicadores financieros sino tam - bién otras medidas no financieras.
- El futuro de esta herramienta gerencial pasa por una integración de la estrategia de la empresa con todas las perspectivas (o stakeholders) con los que se relaciona la com - pañía y con los indicadores concretos para evaluar los objetivos.
- Integrar/alinear nuevas dimensiones al análisis como la RSC, medioambiente, segu - ridad, etc.

(A5) Sistemas de información del mantenimiento.

El primer Sistema de Información de Gestión del Mantenimiento (MMIS, en sus siglas en inglés) apareció alrededor de 1980, coincidiendo con el reconocimiento de la importancia de la Función Mantenimiento dentro de las empresas. Por estas fechas, los ordenadores eran bastante caros y los programadores y las firmas de software comenzaban a descubrir el mercado asociado a la actividad de mantenimiento. Inicialmente, las aplicaciones estaban limitadas a la contabilidad de costes y control de inventarios (centradas en la reducción de las tareas administrativas). Gradualmente, los paquetes MMIS iban incorporando módulos relacionados con la toma de decisiones (control de órdenes de trabajo, planificación, datos de equipos), aunque ninguno representaba realmente un apoyo a la toma de decisiones. Se puede encontrar numero - sos artículos sobre cuestiones como software MMIS “comprar-hacer”y sobre selección de hardware. La investigación sobre las aplicaciones existentes puede ser consultada en Basta (1985), Egol (1988), Jenkins (1988), Nelly (1984), Martín (1989), Smit (1983) y Winter (1984), Pintelon et al. (1999), entre otros.

Son varios también los autores que presentan modelos para justificar la gestión computerizada de la gestión del mantenimiento y el ahorro estimado (Mann, 1980; Mitchel, 1980; Pierce, 1986; Nagurur y Kaewplang, 1999; Westerkamp, 2002; Fitzgerald et al., 1999; Bardey et al., 2005).

En la tabla 8 se recogen los resultados de la evolución en el tiempo y la clasifica - ción de artículos para esta área (Garg, A. et al., 2006):

Tabla 8. Clasificación de artículos por subáreas "A5: Sistema de Información del mantenimiento".

Área 5: *Sist. de Información.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A5.1)Oportunidades creadas por IT	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	*1*
(A5.2) Sist. de información basado en los datos para reducir MTTR / MTBF.	-	-	*1*	-	-	-	-	-	-	-	-	*1*
(A5.3) Desarrollo de sistemas DSS para la planificación del Mtto.	-	-	-	-	-	*1*	-	-	-	-	-	*1*
(A5.4) Misceláneos	-	-	-	-	-	*1*	-	-	*1*	-	*1*	*3*
Total por año	*0*	*0*	*1*	*0*	*0*	*3*	*0*	*0*	*1*	*0*	*1*	*6*

(A6) Políticas de mantenimiento.

La evolución de las políticas de mantenimiento es un referente de la importancia y reconocimiento que iba adquiriendo con el tiempo esta función dentro de las empresas.

Los modelos matemáticos de optimización del mantenimiento suministran un análisis cuantitativo en el que se busca equilibrar la relación coste/beneficio de políticas alternativas de mantenimiento. El óptimo consiste en seleccionar la política o políticas (mix) que garantice el número mínimo de intervenciones necesarias que aseguren la disponibilidad deseada y la calidad de funcionamiento de cada uno de los componentes de los equipos (maximizar el uptime, minimizar el downtime y los costes de mantenimiento).

El primero de los modelos apareció en la década de los sesenta con el libro de Barlow (1967) y el artículo de Mac- Call (1965), siendo estos las referencias estándar. Otros buenos trabajos son los de Barlow (1975), Gertsbakh (1977), Pierskalla (1976), Sherif (1981, 1982), Valdez-Flores (1989) y Cho (1981). Pintelon (1990a) realiza una clasificación de los modelos de mantenimiento atendiendo a la complejidad del entorno de producción considerado.

Dentro de esta sección destacar dos estudios:

- El primero, el realizado por Wang (2002), sobre *políticas de mantenimiento de sistemas que se deterioran/deprecian.* En dicho estudio indica que en la década pasada los problemas de reemplazamiento y mantenimiento de ese tipo de sistemas han sido profusamente estudiados en la literatura. Comenta que miles de modelos de reemplazamiento y mantenimiento han sido desarrollados y pueden ser clasificados en diferentes categorías según su naturaleza (políticas de reemplazamiento por edad, de reemplazamiento en bloque, de PM periódico, etc.). Cada una de las políticas presenta sus características propias, con sus ventajas e inconvenientes. El autor resume, clasifica y compara varias políticas existentes de mantenimiento para sistemas con unidades simples, sobre los que pone el mayor énfasis, y con unidades múltiples.
- Otra revisión importante es la realizada por Pham y Wang (1996). Estos autores discuten en detalle los aspectos relacionados con el *mantenimiento imperfecto.* Los estudios del mantenimiento imperfecto han abierto brechas significativas en las teorías de la fiabilidad y el mantenimiento. La investigación en la ingeniería del mantenimiento se ha desarrollado básicamente sobre los últimos 30 años y más de 40 modelos matemáticos de mantenimiento imperfecto han sido propuestos para estimar medidas de fiabilidad y determinar políticas de mantenimiento óptimas.

Los autores resumen varios métodos de tratamiento y políticas óptimas de mantenimiento imperfecto a lo largo del artículo con pocos resultados importantes.

En la línea de la *integración del mantenimiento,* Irivani y Duenyas (2002), muestran, con un caso de estudio, el beneficio de tomar, de forma integrada, las decisiones de mantenimiento y producción.

De los datos recogidos y analizados desde 293 directores de mantenimiento de empresas industriales suecas del sector manufacturero, Jonson (1999), enfatiza que la integración del mantenimiento produce mejores resultados en prevención, calidad y capacidad de producción.

Tu et al. (2001) presenta un caso de estudio de un sistema integrado de auditoría de funcionamiento del mantenimiento, registro y trazabilidad de costes, control y planifi - cación del RCM, planificación y control, condition monitoring y un sistema de retroalimentación (feedback) de control on- line integrado con planificación y control.

Ip et al. (2000) sugiere el diseño mejorado de un sistema MRPII con la incorpo - ración sistemática de la gestión del mantenimiento.

Cua et al. (2001) investiga el rendimiento de la implementación simultánea de TQM, JIT y TPM. Un área abierta a futuras investigaciones es el estudio de la compatibilidad de la integración de diferentes prácticas simultáneamente.

Entre los nuevos conceptos que han emergido destacan:

- *EMQ (Economic Manufacturing Quantity):* su determinación en un PM imper – fecto (Tseng et al., 1998).
- *Gestión Neural del Mantenimiento* (Polimac y Polimac, 2001). Utiliza el cuerpo de conocimiento de ANN (Redes Neuronales Artificiales) para configurar un sistema de gestión del mantenimiento el cual, de forma permanente, monitoriza el sistema y sugiere las acciones y estrategias más apropiadas, lo que mejora la calidad de las decisiones y reduce el coste total de mantenimiento.
- *Simulación.* Andijani y Duffuaa (2002) realizan una revisión de la literatura sobre el uso de la simulación en mantenimiento. Las conclusiones que obtienen es que muchos de los estudios de simulación sobre sistemas de mantenimiento ignoraban la validación del modelo, el diseño apropiado de experimentos y el análisis apropiado de las salidas. Opinan que los modelos disponibles en la literatura deben ser mejorados tomando como base los puntos anteriores.

El Hayek et al. (2005) utiliza la simulación para estudiar el rendimiento del mantenimiento basado sobre el análisis del LCC de maquinaria compleja.

- *Mantenimiento individualizado o personalizado (customizado).* Este concepto es introducido por Waeyenbergh y Pintelon (2002).En el marco del trabajo descrito en su artículo establecen algunas líneas para desarrollar el concepto. Una característica importante del marco de trabajo desarrollado es que permite la incorporación de toda la información disponible en la compañía, desde la experiencia de los trabajadores de mantenimiento hasta los datos capturados por las TIC.
- *Gestión del mantenimiento orientada al objeto.* Durante la última década, muchas compañías han realizado importantes inversiones en el desarrollo e implementación de sistemas ERP (Planificación de recursos de la empresa). Sin embargo actualmente, pocos de esos sistemas pueden ser considerados para establecer las estrategias de mantenimiento. Nikolopoulos et al. (2003) presenta el diseño de un modelo de gestión del mantenimiento orientado al objeto y su integración en un sistema ERP.

En la tabla 9 se recogen los resultados de la evolución en el tiempo y la clasifica - ción de artículos para esta área:

Tabla 9. Clasificación de artículos por subáreas "A6: Políticas del mantenimiento". (Garg, A. et al., 2006)

Área 6: *Políticas.* ***Subáreas***	*Otros*	*1995*	*1996*	*1997*	*1998*	*1999*	*2000*	*2001*	*2002*	*2003*	*2004 /2006*	*Total subárea*
(A6.1)Integración del mtto.	-	-	-	-	-	1	1	2	1	-	-	5
(A6.2)Conceptos emer gentes:												6
(A6.2.1)Determinación EMQ en PM imper-fecto.	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	-	2
(A6.2.2)Simulación.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	2
(A6.2.3) Concepto de mtto. customizado.	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
(A6.2.4)Gestión del Mtto orientado al objeto.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1
(A6.3) Ideas nuevas	-	-	-	-	1	-	-	1	-	-	1	3
(A6.4) Misceláneos	*(1992)*	-	1	1	-	-	-	-	2	-	-	5
Total por año	1	0	1	1	2	1	1	4	5	1	2	19

- *Principales observaciones:*

- La función mantenimiento debería estar integrada con otras funciones, como producción y control de calidad.
- La gestión del mantenimiento integrada asistida por ordenador (CIMM) es necesaria para compañías industriales con objeto de integrar programación con control de producción y mantenimiento.
- El diseño de un sistema apropiado que permita la integración de la gestión del mantenimiento en un MRPII sería de gran valor para mejorar el MRPII y reforzar la gestión logística de una organización.
- Es necesario la realización de estudios en la implementación integrada de varios enfoques: TQM + JIT + TPM, otros.

2. ASPECTOS VINCULADOS A LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. LA GESTIÓN DE OPERACIONES EN UN ENTORNO INDUSTRIAL.

2.1. La Gestión del Mantenimiento como función de negocio.

2.1.-1. La importancia del mantenimiento como generador de beneficio.

El mantenimiento de equipos de producción industrial puede ser definido, de forma general, como: *"El conjunto de actividades necesarias para reestablecer un equipo, o mantenerlo, en las condiciones de operación especificadas"*.

El objetivo principal del mantenimiento es maximizar la disponibilidad de los equipos en las condiciones de operación especificadas (uptime), con objeto de satisfacer los parámetros de cantidad y calidad de la salida establecidos (objetivos). Ello debe ser realizado a un coste efectivo y conforme a las regulaciones en seguridad, salud y medio-ambientales en vigor (HSE) (restricciones/ condiciones).

En orden a satisfacer los objetivos del mantenimiento, será necesario saber gestionar capacidades y técnicas con objeto de poder integrar personas, políticas (tácticas), equipos y prácticas. También será necesario adecuar las capacidades de la ingeniería y la tecnología con objeto de posibilitar el mantenimiento preventivo, las reparaciones y las revisiones.

El mantenimiento puede actualmente convertirse en una actividad que genera beneficios (una función de negocio), relegando a un segundo plano la consideración clásica de centro de costes impredecible e inevitable.

La definición, diseño y desarrollo efectivo de esta función afecta directamente a (Van Rijn, 1987):

- *La capacidad y volumen de producción.* El mantenimiento contribuye a los volúmenes de producción anual al asegurar la disponibilidad y fiabilidad inherente requerida de los equipos de proceso y las instalaciones.
- *Costes fijos.* Las Horas/hombre asignadas a tareas de mantenimiento forman parte de los costes fijos, a corto y medio plazo.
- *Costes de operación.* El presupuesto asignado a operaciones de mantenimiento engloba partidas como repuestos, consumibles y subcontratación.
- *HSE (seguridad, salud y medioambiente).* Una de las tareas del mantenimiento, en la mayoría de las empresas, es asegurar que los equipos sean seguros para el operador y que no dañen el medioambiente (fugas, emisiones nocivas, consumos excesi - vos/ineficiencias, etc.).
- *Costes indirectos.* Varios autores, como por ejemplo Brazenor (1984) y Hickman (1986), afirman que los costes de mantenimiento pueden ser reducidos hasta un 30% a través de una mejor gestión. Ello justifica, a nivel financiero, los beneficios que se generarían de un mayor rigor en la de gestión del mantenimiento.

El mantenimiento debe ser considerado como una función; esto es, como un conjunto de actividades vinculadas a una serie de procesos cuyo objetivo principal es incrementar los niveles de fiabilidad del sistema.

Como se comprueba, el impacto que puede tener ***la gestión*** del mantenimiento sobre el beneficio de la empresa puede ser importante. La justificación cuantitativa es ilus - trada a través de los estudios realizados en la industria europea (Geraerds, 1989; Malmholt, 1988; Pintelon, 1990 a) y la americana (Basta, 1985, 1988; Brazenor, 1984 y Hickman, 1986).

2.1.-2. Aspectos relacionados con el proceso de toma de decisiones y el plan estratégico.

2.1.-2.1. Uso de técnicas de Gestión: OR/MS.

Las técnicas de Investigación Operativa y la Ciencia de la Gestión (RO/MS) que han sido ampliamente usadas y han demostrado su utilidad en las áreas de producción y de gestión de inventarios, pueden ser igualmente útiles y ayudar a la toma de decisiones en este campo de la gestión del mantenimiento. La filosofía es brindar la posibilidad de realizar una gestión más científica, tanto a nivel estratégico, como táctico, y operativo, que permita el "remplazo" de decisiones soportadas por criterios subjetivos por deci - siones más objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos, tales como análisis de sistema y la construcción de modelos matemáticos. Este enfoque está bastante en sintonía con el propósito de la investigación en mantenimiento a nivel académico.

La modelización de la toma de decisiones se realiza en base a la construcción de un conjunto de funciones objetivo, formuladas con precisión, y un conjunto de complejas restricciones que limitan el conjunto solución.

Por supuesto, y debido al carácter complejo de la gestión del mantenimiento, existirán elementos que no son aptos/apropiados para la modelización matemática, como por ejemplo, determinados aspectos relacionados con el personal y la organización.

Dekker y Scarf (1998) presentan una clasificación de modelos de optimización del mantenimiento mediante el análisis de 112 artículos.

En este trabajo se analiza, de forma resumida:

- la importancia, potencial y limitaciones de las técnicas RO/MS disponibles para la toma de decisiones a nivel táctico y operativo en el marco de la estructura básica para la gestión del mantenimiento y su conciliación con la dinámica de producción.

- Los Informes de funcionamiento (performance). Dado que la gestión implica no solamente planificación y ejecución, sino también control y evaluación de la calidad obtenida de las actividades, los informes de desempeño (performance) resultan indis - pensables para cerrar el lazo de gestión. La importancia de estos informes se refleja en el renovado interés observado, tanto en el mundo industrial como académico, por el estudio de los KPIs.

Es tarea de la función mantenimiento (a nivel industrial) reestablecer un equipo de producción, o mantener este, en unas condiciones de operación especificadas. La polí - tica de mantenimiento elegida afecta al comportamiento al fallo, y por tanto, a la capacidad de producción disponible y los costes de operación.

Resulta interesante, como tema de investigación para evitar la suboptimización, la búsqueda de nuevos modelos que combinen, de forma apropiada, elementos de las áreas de mantenimiento y producción ("óptimos anidados").

En la misma línea, también resulta interesante los procesos de simulación para apoyar la toma de decisiones para:

- ensayar diferentes políticas de mantenimiento y valorar los efectos sobre la situación de producción, y otras funciones del negocio.
- Determinar los trade-off de costes asociados.

2.1.-2.2. Reducción de costes indirectos: el beneficio oculto del mantenimiento.

Durante la segunda mitad de este siglo se va pasando paulatinamente de un *"mercado de demanda"*, donde lo más importante es producir sin una preocupación excesiva en el coste, a un *"mercado de oferta"*, donde aparece la competencia. Ello hace que no solo haya que producir, sino que hay que hacerlo bien al menor coste posible con objeto de situar nuestra oferta entre las más competitivas del mercado. Si este era ya un hecho en las economías nacionales con barreras arancelarias protectoras, se ha visto fuertemente incrementado con la internacionalización y la globalización de los mercados. Ahora, estrategias basadas en el precio, en la calidad, y en el plazo de entrega, están a la orden del día, y todas ellas están íntimamente afectadas por el concepto de coste de producción. Características como las mencionadas han pasado de ser definidas por el proveedor a ser definidas por el mercado (cliente), con lo cual, lo que antes podía ser una ventaja competitiva, ahora es un requerimiento del mercado. Tómese como ejemplo el comportamiento del precio en ambos tipos de mercado (figura 18):

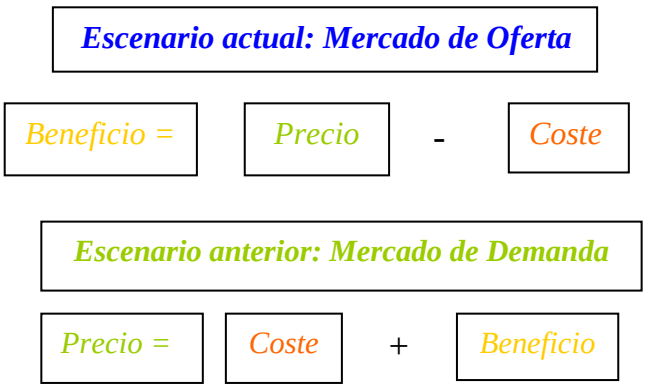


Figura 18: Comportamiento del precio en ambos tipos de mercado.

En un ***mercado de demanda,*** el fabricante suma al coste de producción el beneficio que considera razonable obtener, y como resultado, obtiene el precio de venta final del producto.

En un ***mercado de oferta***, dado que el precio viene fijado por el mercado, el beneficio se obtendrá restando al precio los costes. En conclusión, en este nuevo escenario, el beneficio aumenta al reducir los costes operativos.

Matemáticamente, ambas ecuaciones son la misma; sin embargo, reflejan realidades distintas. Algo parecido ocurre en el mercado con la calidad y los plazos de entrega. Incluso con mayor radicalidad, el no cumplir con determinados niveles exigidos por los clientes, de calidad y plazos de entrega, podría dejar el producto fuera de mercado, incluso con precios sensiblemente más bajos.

En este entorno competitivo es donde realmente se toma conciencia de que el Mantenimiento es importante en la producción de bienes y servicios, y que la aplicación de técnicas y métodos correctos de mantenimiento llevará a menores costes, mejores plazos de entrega, niveles de calidad más homogéneos y otras mejoras de interés.

La visión tradicional del Mantenimiento como un gasto inevitable está cambiando. Lo confirma el éxito de determinadas corrientes filosóficas en el ámbito del Mantenimiento, como el TPM y RCM, que han servido, como mínimo, para realizar una profunda reflexión sobre el Mantenimiento y su importante papel en la actividad industrial.

El primer cambio de mentalidad quizá sea dejar de considerar la función Mantenimiento como un gasto inevitable, algo que hay que sufrir, y contemplarlo como una inversión rentable que contribuye a aumentar los niveles de productividad y competitividad. Por esto es importante prestar la adecuada atención a la Formación del personal de Mantenimiento, a la tecnología y herramientas utilizadas en el departa - mento, así como también a las técnicas y métodos aplicados para su control y gestión.

2.1.-2.2.1. Costes asociados al Mantenimiento. Clasificación.

Los costes de mantenimiento tienen nuevos componentes que aparecen de forma progresivamente dominante en la estructura de gestión (figura 19):

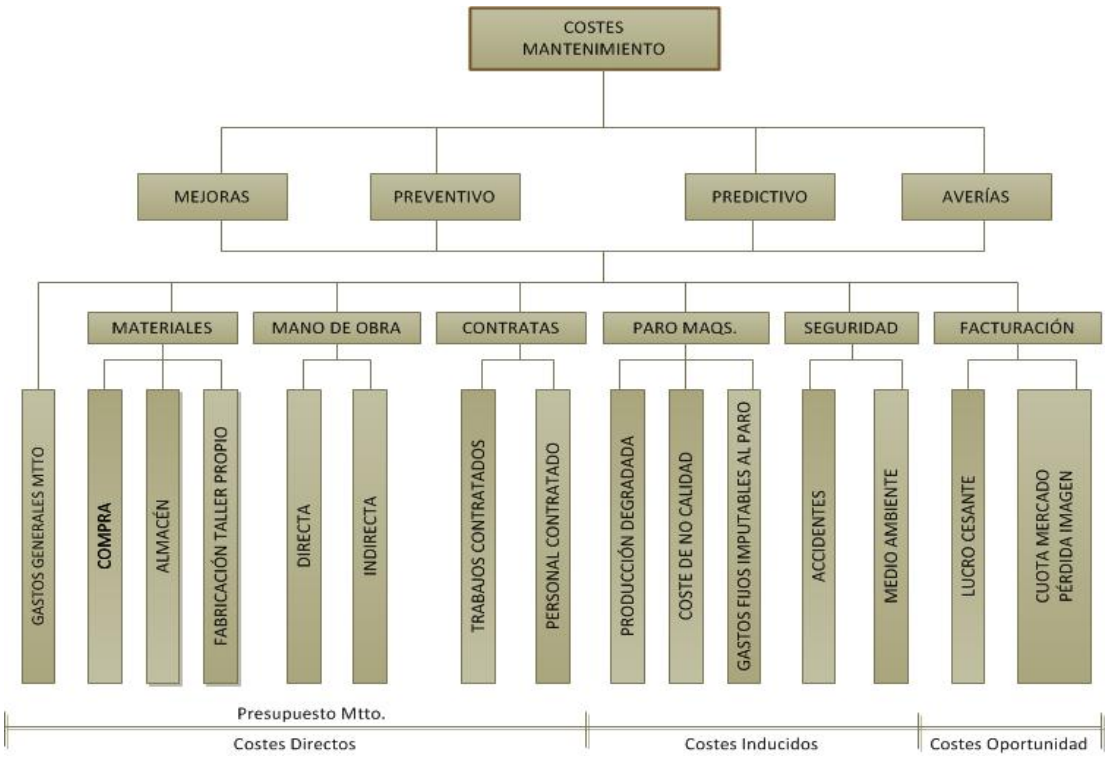


Figura 19: Los costes del mantenimiento (Adaptado de Sisteplant).

Los costes de Mantenimiento se pueden clasificar, básicamente, en dos categorías:

1ª) Costes directos ("costes visibles"). Son aquellos que son generados directa - mente por la función; es decir: materiales de repuesto, mano de obra, formación, herramientas, energía, consumibles, subcontratación, entre otros.

Son los que se suelen considerar como base a la hora de realizar el presupuesto.

2ª) Costes indirectos o de "no mantenimiento" ("costes invisibles" u ocultos).

Estos costes suelen ser mayores que los directos y muchas veces no son considera – dos, al menos en su justa medida. Algunos autores (Amstrong, 1987) lo han dado en llamar el iceberg del Mantenimiento (figura 20) ya que normalmente es más grande la parte sumergida (la no visible), y de más difícil cuantificación, que la emergida (la visible). Los costes indirectos se pueden dividir, a su vez, en:

- ***Costes inducidos.*** Dentro de este tipo de costes destacan:

(a) Los vinculados con el deterioro acelerado de los equipos de producción:

.Desgaste acelerado por pobre mantenimiento = deterioro prematuro = aumento del LCC (Coste del ciclo de vida).

.Exceso de paradas: bajo uptime, alto downtime (planificado y no planificado).

.Exceso de repuestos en inventario.

.Equipos redundantes innecesarios.

.Consumo desproporcionado de energía: sobrecoste energético por pérdida de eficien - cia de la instalación (nuevos arranques tras una avería o parada, etc.).

.Niveles de emisiones elevadas (ruidos, humos, gases).

.Niveles de seguridad bajo; otros.

(b) Los que afectan a la producción:

.Repeticiones debidas a una deficiente calibración, ajuste de los equipos, etc.

.Exceso de desechos y pérdidas de material en curso.

.Retrasos en los envíos.

. Baja productividad por: averías, reducción de velocidad, reducción del rendimiento de las máquinas, etc.

.Horas extras por ineficiencias; otros.

(c) Los relacionados con la calidad del producto:

.Reducción de los niveles de calidad y fiabilidad.

.Ejecución de garantías por clientes insatisfechos.

.Aumento del nivel de inventario.

.Reducción de márgenes; otros.

.Gastos financieros debidos a retrasos en la entrega, etc.

(d) Los relacionados con la seguridad: aumento de los niveles de siniestralidad y accidentes = aumento de las bajas laborales + primas de seguro.

(e) Los que afectan al medioambiente: aumento nivel de emisiones (ruidos, hu - mos, gases, vertidos) = aumento penalizaciones administrativas + medidas correctoras.

- ***Costes de oportunidad.*** Destacan dos tipos básicos:

(a)Lucro cesante. Este es un componente especialmente importante para aquellas empresas de proceso continuo que trabajan al límite de capacidad. Se entiende como tal, el coste por los beneficios no obtenidos consecuencia de una menor producción, y por tanto, de una menor venta.

(b)Pérdida de imagen. Son los vinculados con las pérdidas de calidad, retraso en las entregas comprometidas, etc.

El objetivo de cualquier estrategia de Mantenimiento debería estar encaminado a reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos, donde estaría especialmente centrado el "Beneficio derivado del Mantenimiento".

Lógicamente, el planteamiento es distinto según la empresa de la que se trate y del sector de actividad en la que se encuentre. El planteamiento es válido para la mayoría de

las industrias de proceso continuo, las cuales trabajan normalmente al límite de su capacidad. Son industrias intensivas en capital con fuertes inversiones que rentabilizan cuando la productividad es muy alta. Por tanto, el punto muerto de rentabilidad suele estar cercano al de producción, por lo que un pequeño aumento en el nivel de producción suele revertir en aumentos significativos del beneficio (una vez que los costes fijos de producción han sido cubiertos).

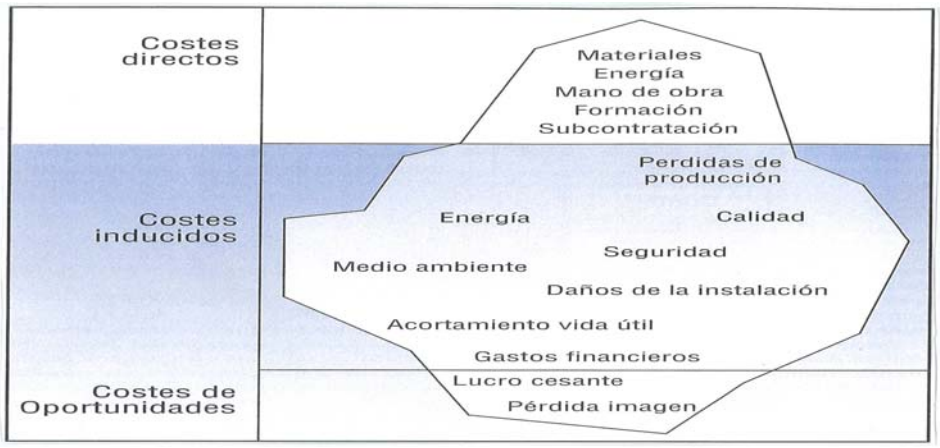


Figura 20: Iceberg de costes en mantenimiento.

Investigaciones recientes han mostrado tres conclusiones interesantes:

(a) Los costes de mantenimiento directo solamente representan aproximadamente la mitad de la influencia económica real del mantenimiento en empresas industriales.

(b) En compañías industriales expuestas a mercados dinámicos y turbulentos la capacidad de generar ingresos es más sensible a los esfuerzos destinados al mantenimiento y a garantizar los niveles de disponibilidad que a los propios costes de producción.

(c) La progresiva automatización de los procesos de fabricación industrial *está aumentando la intensidad de la inversión en capital inmovilizado.* Ello demanda una mayor efectividad del mantenimiento y mayores niveles de disponibilidad, tal y como se muestra en la figura 21:

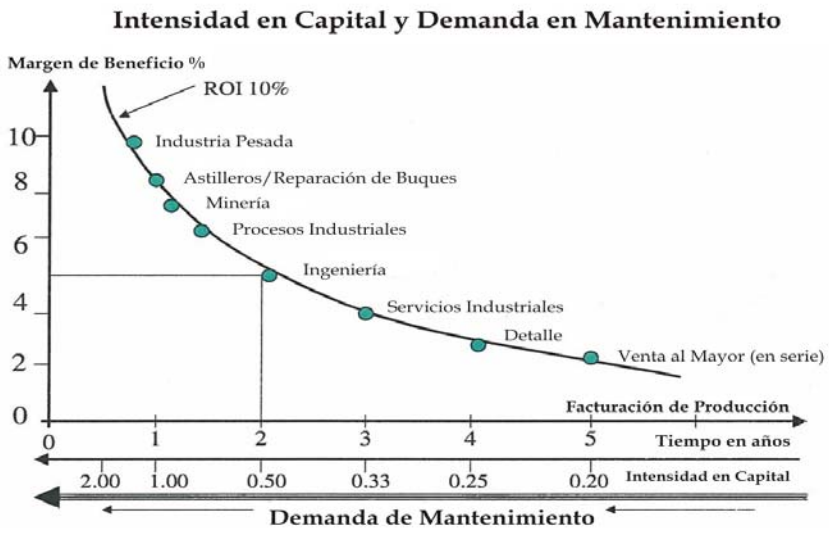


Figura 21: Relación Intensidad de capital & demanda de mantenimiento. (Hans Ahlmann, 2002)

Algunos trabajos de investigación desarrollados dentro del marco del Swedish Center for Maintenance Engineering and Management (UTC) han demostrado la relación entre los costes directos e indirectos en mantenimiento y la pérdida de ingresos generada por la insuficiencia en el mantenimiento y la disponibilidad de los activos durante variaciones en las condiciones de mercado (figura 22). Los estudios analizan hasta 16 sectores (químico, industria del papel, ingeniería, minería, industria del medicamento). También demostraron que las pérdidas de ingresos relacionadas con el mantenimiento y la disponibilidad eran sensibles a las características del mercado (estable o turbulento) y la situación de la demanda (ciclo económico: alta demanda (boom) o baja demanda (crisis/recesión)).

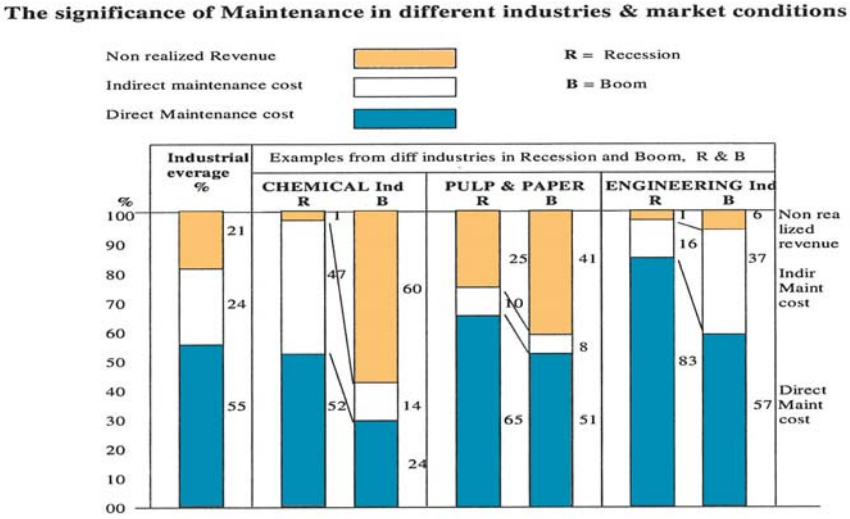


Figura 22: Mantenimiento y ciclo económico. (Hans Ahlmann, 2002)

Estos nuevos descubrimientos ponen de relieve la importancia creciente que va adquiriendo la función mantenimiento al compás de los nuevos contextos industriales inducidos por las dinámicas del mercado.

2.1.-2.3. La Gestión del Mantenimiento en un entorno competitivo. Principios básicos.

En el mantenimiento de activos físicos existe una acusada tendencia a poner el acento sobre dos puntos básicos:

- *Los aspectos técnicos* que atañen directamente a los responsables de los servicios especializados.
- *Los gastos* en los que se incurren para el desempeño de esta función.

Sin embargo, es menos frecuente encontrar referencias que permitan relacionar el producto de las acciones de mantenimiento con la rentabilidad de los activos físicos a los que se aplican las técnicas y los recursos *("ROI_M: Retorno de la inversión asociado a las acciones y recursos destinados a mantenimiento).*

Los términos y el enfoque utilizados en el ámbito de la gerencia suelen caracterizarse por tener una fuerte connotación económica que dista del enfoque técnico y vocabulario específico utilizado por los técnicos especialistas en mantenimiento. Esta distancia entre los diferentes modos de expresión hace que, en muchas ocasiones, no se perciban con suficiente nitidez las relaciones que justifican la rentabilidad económica del mantenimiento.

El salto cualitativo que debe perseguir la función mantenimiento con objeto de dar respuesta a las exigencias continuas establecidas por las diferentes dinámicas del mercado, es su evolución del actual enfoque basado en la intervención a uno nuevo centrado en la prevención y el aseguramiento del estado.

2.1.-2.3.1. El binomio del mantenimiento. El mantenimiento como función gerencial y técnica.

Considerando el mantenimiento como el conjunto de acciones necesarias para sostener la funcionalidad del capital inmovilizado en los activos físicos, los cuales constituyen la infraestructura de la función productiva de la empresa, se puede concretar que los dos aspectos básicos del mantenimiento son: la prevención de fallos y la reparación rápida de averías cuando las técnicas de prevención no han conseguido su propósito.

En consecuencia, las actividades esenciales asociadas a la función mantenimiento vendrán representadas por aquellas destinadas a conservar el estado operativo de las instalaciones y restablecer dicho estado cuando alguna circunstancia imprevista ocasione su degradación, aplicando para ello, las técnicas más eficientes en cada situación concreta.

Para soportar la función mantenimiento se incorporan a la estructura organizativa servicios especializados en diferentes técnicas de mantenimiento, entre las que residen destrezas específicas. Conviene matizar que mediante una adecuada tipificación de tareas, es posible distinguir las actividades específicas de mantenimiento de aquellas otras que surgen con motivo de nuevas inversiones, reformas de instalaciones y otras actividades conceptualmente diferentes de la función específica de mantenimiento; ello permite una asignación correcta de los costes asociados a la propia función mantenimiento y conocer cómo se está invirtiendo el esfuerzo del equipo humano de mantenimiento.

En un entorno competitivo, las tareas de mantenimiento no tienen, ni deben ser, exclusivas de los servicios de mantenimiento. La eficaz dirección de las actividades de mantenimiento debe concretarse en resultados tangibles que aporten valor añadido a la función productiva, proceso en el cual también se encuentran implicados el resto de servicios técnicos (operación, ingeniería, control de calidad, seguridad, compras).

Cuando los objetivos de la unidad productiva están orientados hacia la optimización del proceso, el mantenimiento es cosa de todos los agentes.

Se tratarán algunas particularidades relacionadas con los aspectos gerenciales del mantenimiento y su rentabilidad (figura 23) dentro de un marco de referencia al que están asociados la gestión, la función técnica de mantenimiento, la competitividad de la empresa y el entorno (económico, social, cultural y ambiental).

Uno de los retos actuales es conseguir un vocabulario y unas prácticas de gestión comunes a todos los niveles que haga converger las prioridades de la Alta gerencia (centradas en la rentabilidad de la empresa) con los quehaceres técnicos (centrados en las tareas de mantenimiento).

Figura 23: El bucle de la gestión del mantenimiento.

Las condiciones del entorno y la competitividad son variables exógenas.

La gestión y las acciones de mantenimiento representan el campo donde hay que actuar con eficacia y eficiencia con el fin de mejorar la rentabilidad del capital inmovilizado.

(A) Eficacia del mantenimiento. Gestión de la disponibilidad.

La *disponibilidad y la fiabilidad* constituyen los dos índices básicos que permiten medir la *eficacia del mantenimiento.* Las dos causas principales que perturban la disponibilidad son:

- *Las averías en los equipos esenciales (críticos) de las instalaciones que obligan a paradas forzosas (downtime no programado) y,*
- *las paradas programadas para realizar actividades de mantenimiento preven - tivo (downtime programado).*

Las averías en los equipos, además de la ineficiencia que suponen para el capital invertido, conllevan un importante consumo de recursos económicos para su reparación. De aquí que la reducción del número de fallos sea una de las primeras reglas en la gestión del mantenimiento, hasta el punto de constituir el concepto de mantenimiento preventivo y de justificar la presencia de los servicios de mantenimiento en la estructura organizativa responsable de la explotación de las instalaciones. Señalar la importancia de evitar fallos para mejorar la eficacia del mantenimiento (condición previa para conseguir la eficiencia).

El concepto de mantenimiento preventivo se ha visto enriquecido con la aparición de las modernas técnicas de mantenimiento predictivo y proactivo y el desarrollo de técnicas como la inteligencia artificial, los Sistemas Expertos, etc.

La segunda causa de indisponibilidad son las paradas programadas derivadas de la necesidad de llevar a cabo una “revisión general”, el programa de preventivo, etc.

Establecer el momento óptimo del ciclo de vida operativa para realizar una parada para revisión, sustitución, etc., constituye una de las más complejas y controvertidas decisiones de los directores de mantenimiento. Las técnicas de mantenimiento predic - tivo, los Sistemas Expertos, el LLC, los CMMS, etc. representan valiosos aliados para los responsables de la gestión del mantenimiento en el proceso de toma de decisiones.

Además del periodo de inactividad del capital invertido, las revisiones generales suponen un gran consumo de recursos, razón por la cual, las decisiones deben estar fundamentadas en criterios de eficacia y eficiencia con objeto de poder identificar con precisión los gastos incurridos, el lucro cesante y las partidas presupuestarias asociadas.

(B) Eficiencia del mantenimiento. Gestión de los gastos y el presupuesto.

Los recursos humanos propios (plantilla de los servicios de mantenimiento), los materiales y los servicios exteriores representan las principales partidas de los costes que en todos los ejercicios se trasladan directamente a la cuenta de resultados. Por tanto, la productividad de estos recursos es un factor esencial en la eficiencia del mantenimiento.

El índice de rotación de los materiales y de los repuestos, la adecuada formación del personal y la contratación de servicios exteriores eficaces y competitivos, constituyen elementos gerenciales básicos que pesan directamente en el resultado de la gestión.

Por lo que respecta al presupuesto anual, y según se desprende de la encuesta realizada por la Asociación Española de Mantenimiento, solamente el 85% de las empresas disponen de un presupuesto anual definido. De ese 85%, son demasiadas las empresas donde los presupuestos son impuestos o forzados hasta el punto de que difícilmente los jefes de mantenimiento se sienten responsables de su cumplimiento.

En el contexto descrito poco puede añadirse en lo que se refiere al proceso de elaboración, aprobación y gestión del presupuesto. Cabe plantearse una pregunta en esta situación ¿Están incluidos en el presupuesto de mantenimiento los gastos fijos y variables de los recursos humanos propios, de forma explícita y clara?

Toda gerencia de mantenimiento orientada a los resultados de la unidad productiva debería conocer e incorporar los elementos cuantitativos que permitieran valorar la aportación de la función mantenimiento a los beneficios. Parece que en la situación actual, disponer de estos elementos (que representan la fuente de ingresos y de valor añadido del mantenimiento) está lejos de poder ser valorados de una forma minimamente objetiva. La razón: ¿Cómo se puede conocer el valor añadido del mantenimiento cuando no se conocen los criterios presupuestarios y la cuantía de las partidas que los componen?

En este estado de cosas, resulta claro que para mejorar el nivel de competitividad de las empresas hay que actuar sobre algunos comportamientos. Entre ellos: el estableci - miento de una política de mantenimiento corporativa (BSC), la definición de una clara normativa presupuestaria, la utilización de herramientas de gestión adecuadas ,el control de resultados.

La única forma de hacer gestión dentro de mantenimiento es trabajar en base a presupuesto. El área de mantenimiento industrial debe realizar o participar en la elaboración de tres tipos de presupuestos:

- *Presupuesto de las órdenes de trabajo que llegan al departamento* para su ejecución. Cada trabajo solicitado demanda medios y recursos, lo cual lleva asociado un costo que debe estar presupuestado. Para poder establecer estos costos es necesario tener bien identificados y actualizados los parámetros asociados a cada tarea de mantenimiento.

- *Presupuesto de obras nuevas y de grandes paradas*. Estos trabajos de mayor envergadura son planificados con suficiente antelación para apoyar la toma de decisiones y acreditar el nivel de compromisos a adquirir. Los presupuestos elaborados deben ser presentados al responsable del área involucrada o a la que se le va a hacer el trabajo, para su aprobación. Luego, pasa a la consideración del área administrativa (asignación del código de imputación) y financiera (para que prevean las asignaciones y establezcan las precauciones necesarias en caso de que la alta dirección apruebe la inversión).En el caso de aprobada la actuación, la organización de los trabajos llevaría asociada la apertura de muchas órdenes de trabajo.

- *Participación en la elaboración del presupuesto operativo de las áreas de fabricación*. Las figuras 24 y 25 muestran el procedimiento que habitualmente se sigue en la elaboración de los presupuestos operativos:

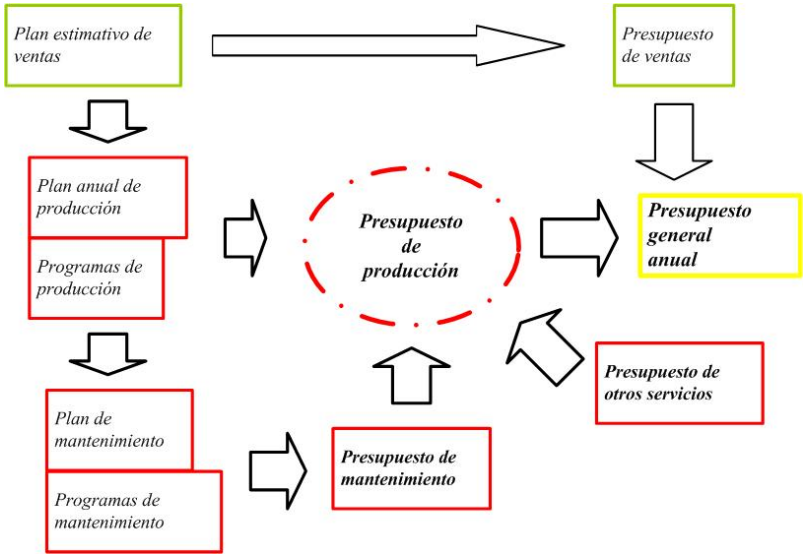


Figura 24: Principios para la definición del prepuesto operativo.

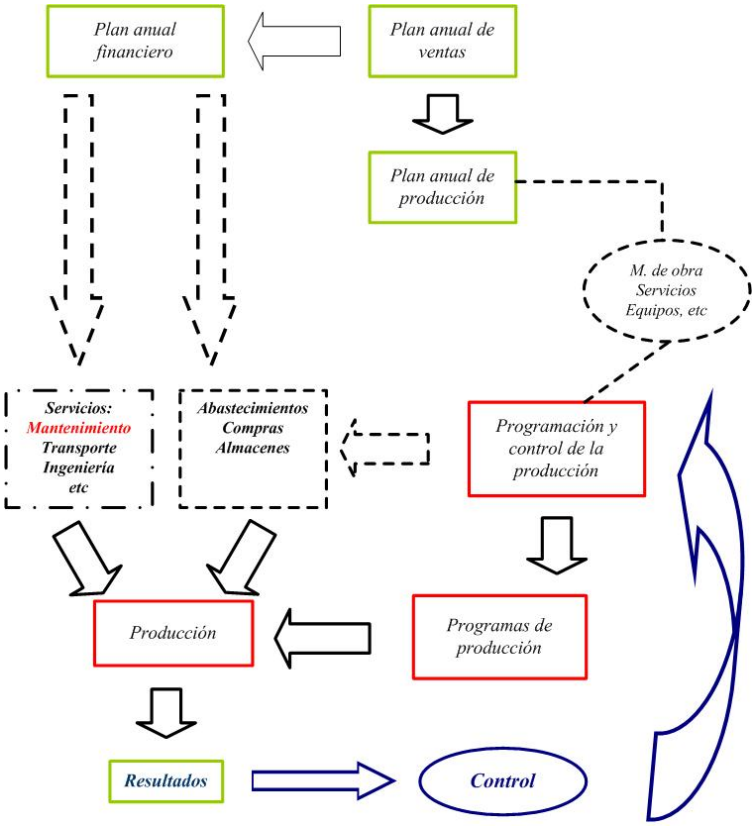


Figura 25: Participación del Mantenimiento en la definición del presupuesto operativo.

Estas acciones, en conjunto, representan la base de lo que se denomina el *"mantenimiento económico"*.

(B1) Nuevas tendencias en la planificación presupuestaria: Rolling Forecast.

El entorno de cambio constante en el que operan la mayoría de las empresas ha propiciado la introducción de un modelo de planificación presupuestaria basado en el aumento de la frecuencia con la cual se determina el presupuesto con objeto de adaptarlo a este dinamismo.

El objetivo del *"Rolling Forecast"*es el de realizar las previsiones presupuestarias más de una vez al año para periodos de tiempo constantes e independientes del año fiscal o natural.

Una empresa que realiza un rolling forecast cuatrimestral, revisará el presupuesto a finales de cada trimestre para los próximos cuatro trimestres, independiente de cuando finalice el año fiscal o natural.

La integración de este concepto, como instrumento de gestión, permite a las empresas reaccionar con mayor rapidez ante cambios del entorno. Ello alentará a los gerentes a contemplar el proceso de presupuestación como un proceso dinámico y constante. Este nuevo enfoque permitirá que las decisiones en el corto plazo se alineen con la estrategia a largo plazo, ya que siempre se contempla el mismo periodo de tiempo, no obligando, como sucede con el enfoque estático actual, a focalizar los esfuerzos en "ajustar" los recursos presupuestados para que cuadren los resultados a final de año.

La frecuencia del proceso de planificación depende del tipo de empresa y del ámbito de negocio en el que se encuadre. Mientras que algunas empresas han adoptado este nuevo concepto, otras realizan una planificación anual y un seguimiento mensual con alguna revisión interanual.

Las claves están en garantizar el seguimiento y las revisiones necesarias para realizar los ajustes que sean demandados por los cambios relevantes introducidos.

2.1.-2.3.2. Mantenimiento y competitividad: ¿Qué mantenimiento debe realizarse?

El mantenimiento es un conjunto de actividades técnicas y administrativas cuya finalidad es conseguir la máxima disponibilidad y fiabilidad de las instalaciones, teniendo en cuenta la seguridad de las personas, la preservación del medio ambiente y la calidad y continuidad del servicio, al objeto de prolongar la vida útil de los equipos al mínimo coste posible.

Las posibilidades de futuro de toda empresa que fundamente su negocio sobre la productividad de activos físicos pasa ineludiblemente por el filtro de la competitividad, y por tanto, del beneficio.

La competitividad está haciendo bascular el orden de importancia hacia el aseguramiento del estado, lo cual depende de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación; es decir, de las acciones que Mantenimiento realice antes y después de la puesta en servicio. Esto justifica la Función Mantenimiento como fuente directa de beneficios más que como coste indirecto que reduce los beneficios finales.

De esta forma, la Función Mantenimiento debe dar respuesta en los tres niveles que garantizan la competitividad:

1. *En el nivel inicial de inversión,* con exigencias de diseño, construcción y montaje.
2. *En los costes operativos,* a través de la política/estrategia de mantenimiento seleccionada.
3. *A nivel de facturación,* según la capacidad que presente continuamente para garantizar el estado del equipo.

El objetivo del mantenimiento no es sólo que se reparen los equipos lo mejor posible, sino que además, la intervención se realice en el menor tiempo posible.

Luego, la función mantenimiento tiene una importancia logística y estratégica central. Por su relación con producción, influye directamente en la cuenta de resultados. Por su repercusión con los stocks y el estado de los equipos e instalaciones, influye en la cuenta de balance.

La gestión del mantenimiento integra la organización necesaria (estructura de per - sonal, codificación e inventario de equipos, procedimientos y órdenes de trabajo,

medios, etc.) de manera que se puedan presupuestar las actividades, planificar las mejoras y renovaciones, programar y ejecutar los trabajos e informar y evaluar los resultados.

El Mantenimiento tiene poca influencia en la fijación de precios de mercado, pero sí tiene mucha en la reducción de costes y en el incremento de la calidad.

La elección y utilización de las técnicas de mantenimiento más adecuadas contribuye a la mejora de la eficiencia de la gestión, facilita la investigación metódica de fallos y reduce el coste del mantenimiento.

2.1.-2.3.2(a) Modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado.

Las actuaciones de mejora sobre los procesos de producción tales como, la introducción de programas de calidad, de mejora continua, reingeniería, nuevos sistemas de producción, impuestas por las exigencias de la competitividad han incrementado la importancia de la función mantenimiento. Emerge un "*mercado del mantenimiento"*que es descubierto por las empresas de software y consultoría. Cada vez más tareas de mantenimiento son externalizadas. Las empresas subcontratadas suministran servicios especializados o simplemente ayudan a cubrir "picos" de carga de trabajo. Los equipos más sofisticados de producción, el incremento del nivel de automatización de los controles, tanto en la vertiente administrativa como de gestión (inspecciones remotas, controladores de campo, PLCs, sistema de control distribuido, etc.) exige una formación adicional del personal de mantenimiento (especialmente para el diagnóstico técnico) con objeto de adaptarlos a las evoluciones tecnológicas introducidas. Ello permite mayores oportunidades de carrera que en el pasado, a la vez que introduce nuevos retos en la gestión del mantenimiento.

El aumento de la automatización y la reducción del nivel de inventario de productos en proceso *(WIP:work – in- process)* son estrategias de producción que se están adoptando como medios para mejorar los niveles de productividad, especialmente en compañías que tienden hacia un sistema de producción JIT. Estas tendencias generan dos consecuencias principales en la gestión del mantenimiento:

1. *Un aumento de los costes del downtime.* Una avería en una máquina no sólo afecta a la salida de la misma sino que afecta a toda la línea "aguas abajo", con el consiguiente aumento de costes de producción debido al acoplamiento de máquinas y la reducción de los buffer de stocks. Los problemas de gestión del mantenimiento que quedaban ocultos tras los buffer emergen ante las nuevas estrategias de producción impuestas por la competitividad.
2. *Un aumento de los costes de mantenimiento.* La dificultad de acompasar la experiencia técnica del operador a los avances tecnológicos implantados (debido a la complejidad/sofisticación de las máquinas) minora su capacidad a la hora de establecer diagnósticos técnicos apropiados que permitan realizar ajustes para evitar paradas no planificadas y averías.

Por tanto, la función mantenimiento empieza a adquirir una posición crítica dentro de la organización. Ello creará la necesidad de definir un modelo de referencia que permita diseñar, de forma dinámica e integrada, un sistema que resulte efectivo y eficiente para su gestión en tres áreas básicas: planificación, mejora de métodos de mantenimiento y servicio de mantenimiento (MRO).

En este modelo, la verdadera planificación no comenzaría con el enfoque tradicional (reactivo) de planificación y programación de los trabajos de preventivo. El concepto se ampliaría (enfoque proactivo) para iniciarla con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas *("guías de requerimiento de servicios")* y la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos *("guías de planificación").* La idea es intensificar el concepto de *"mantenimiento planificado"*con objeto de reducir los costes

potenciales asociados al downtime. Las “guías de planificación” y las “guías de requerimientos de servicio”serían excelentes documentos de referencia para iniciar el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

En las “guías de requerimientos de servicio”se identificarían y priorizarían las rutinas de inspección y secuencias de mantenimiento. Ello contribuiría a: la reducción de la probabilidad de fallo; al control del nivel de inventario MRO; la reducción de los costes de los trabajos de reparación y los costes de materiales; facilitar la tarea de presupuestación.

Existen numerosos sistemas de planificación disponibles que pueden ser utilizados para definir las “guías de planificación”, los cuales pueden ser adaptados a las situaciones específicas de cada organización. La mayoría están desarrollados para la planificación del mantenimiento preventivo; Jack Brown (1984), propone y discute un plan general para obtener un programa de PM.

Una buena fuente para obtener datos standard de mantenimiento es The Navy Departament and Universal Maintenance Standard.

En el área de mejora de métodos de mantenimiento, es importante tener en cuenta que para reducir los costes de mantenimiento es necesario reducir varios componentes del downtime. Algunas de las áreas potenciales de investigación serían:

- Mejora de los sistema de diagnóstico (Maramatus, R. y Y. Tanaka, 1982).
- Desarrollo de métodos para la revisión de la configuración del sistema (Setup).
- Desarrollo de técnicas de análisis de actividades y procesos.
- Desarrollo de métodos para el diseño de planes y programas de educación y forma - ción.
- Grupos de mejora.
- Técnicas de control de inventario MRO.

Es importante también el desarrollo de métodos/técnicas que permitan valorar, de forma precisa y dinámica, el efecto del binomio producción - gestión/estrategia de mantenimiento sobre los resultados de producción. Ello contribuiría a mejorar la toma de decisiones, los niveles de productividad y competitividad y el ROI de los activos.

Las figuras 26 y 27 muestran un ejemplo gráfico de la obtención del punto óptimo para determinar la proporción CM-PM considerando la relación coste downtime - coste de mantenimiento para una misma configuración. Se toma como variable los buffer de reserva. Otros escenarios pueden ser valorados (máquinas críticas duplicadas, ciclo de mercado; otros). Una técnica propuesta sería la de “comparación a pares”:

Comparación de los costes de mantenimiento correctivo y preventivo [Gilbert,J.P.,Finch,B.J.,1985]
(en base al coste del downtime)

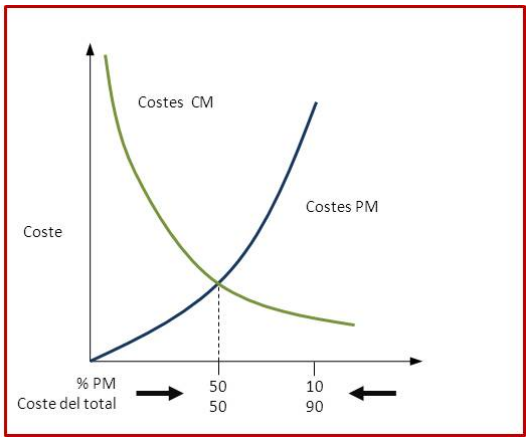


Figura 26: Distribución CM-PM (Con buffer de reserva). Efecto coste mantenimiento sobre coste de downtime.

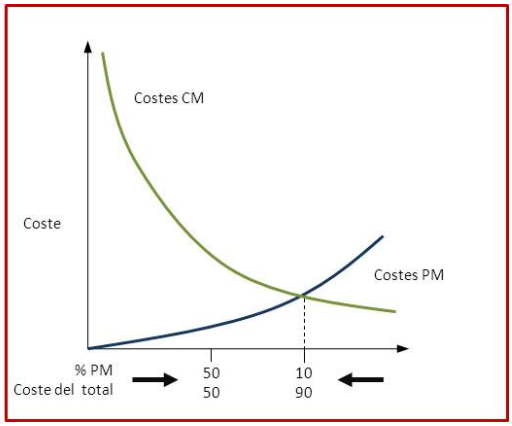


Figura 27: Distribución CM-PM (Sin buffer de reserva). Efecto coste mantenimiento sobre coste de downtime.

(*)El coste de downtime aumenta sustancialmente al aumentar la dependencia de una máquina sobre otra y la reducción del nivel de los buffer de reserva. En la figura 27, el coste del downtime es mayor, lo que hace el coste de PM más económico en comparación con la situación de la figura 26, por lo que la distribución CM-PM se altera (10:90 frente a 50:50).

Modelo general de mantenimiento.

Varios han sido los intentos a la hora de desarrollar un modelo general que permita comprender la aportación/ papel de la función mantenimiento a los procesos de negocio. La mayoría se centran en la descripción del entorno de la función y su contribución al ciclo de vida del producto.

Uno de los modelos que emergió a finales de los setenta para la industria en el Reino Unido fue el de la terotecnología (figura 28). Esta filosofía ofrece una visión de la Función Mantenimiento combinación de gestión, ingeniería financiera y otras prácticas aplicadas a los activos físicos en la búsqueda de economías del coste del ciclo de vida:

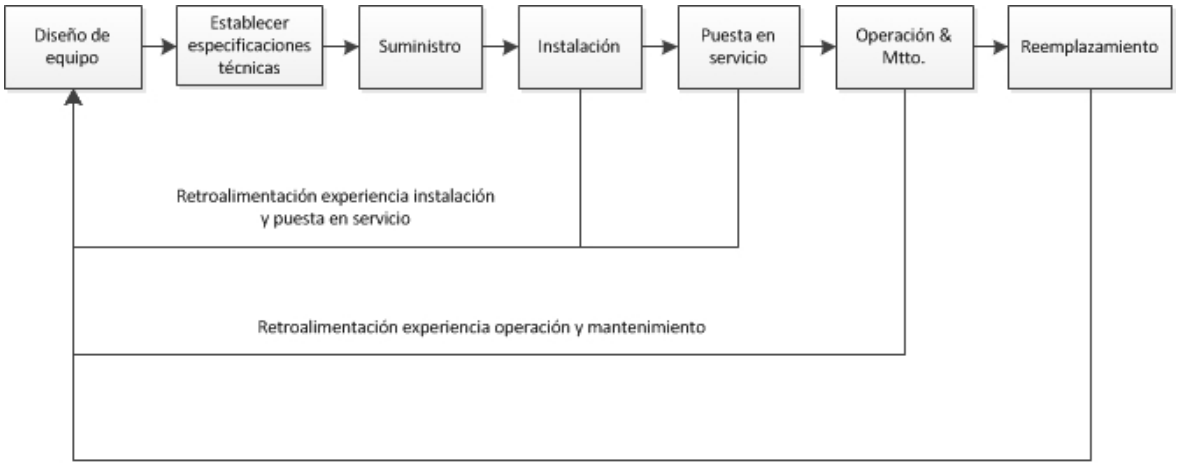


Figura 28: Modelo terotecnología [Coetzee, J.L., 1997/2].

Está relacionada con:

- La especificación y diseño para la fiabilidad y mantenibilidad de plantas, maquinaria, equipos, construcciones y estructuras.
- Su instalación, puesta en servicio, mantenimiento, modificación y sustitución.
- Feedback de información sobre diseño (por ejemplo, en diseños modulares), rendimiento y costes.

Aunque la filosofía es interesante, y ha recobrado cierta popularidad, no ha sido tenida muy en cuenta por parte de la industria debido, básicamente, a dos factores:

(a) la falta de métodos y técnicas prácticas.

(b) La necesidad de ampliar el enfoque para integrar a los profesionales del mantenimiento con objeto de contemplar los procesos internos a la propia organización que estaban bastante descuidados.

Sin embargo, contribuyó a mejorar la conciencia sobre la importancia del mantenimiento como función de negocio.

Un modelo mejorado es el desarrollado por la Eindhoven University of Technology (E.U.T.), el cual, sin descuidar los componentes del modelo anterior, se concentra más en los procesos internos de la organización del mantenimiento en respuesta a las limitaciones declaradas (figura 29):

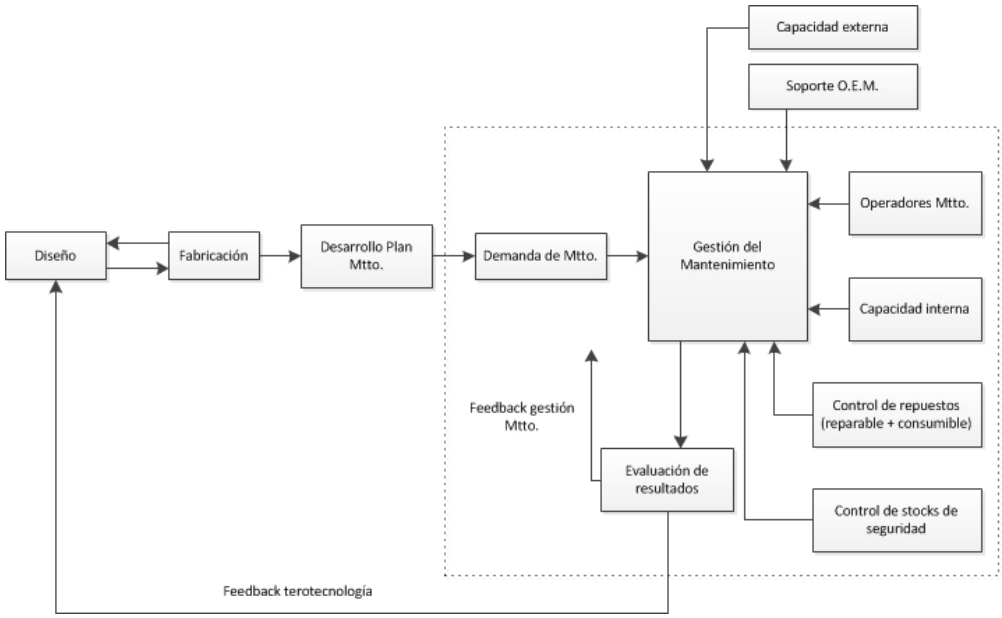


Figura 29: Esquema simplificado del Modelo EUT [Coetzee,J.L.,1997/2].

Para un estudio en detalle consultar Geraerds, W.M.J., 1990.

Aunque se trata de un modelo mejorado, aún no explica bastante bien los procesos internos a la organización del mantenimiento.

2.1.-2.3.2 (b) Estrategias y políticas de Mantenimiento. Tendencias.

B.1. Estrategias de Mantenimiento.

Para el Mantenimiento de las instalaciones productivas (Nivel 2: Mantenimiento en la fase de operación) existen diferentes ”tipos”, formas o estrategias comúnmente acep - tadas, las cuales se pueden agrupar dependiendo si actúan antes(preventivo) o después (reactivo) de producirse la avería. Indicar que no son excluyentes entre sí:

. Mantenimiento Reactivo (Curativo o de emergencia y Correctivo).

La instalación recibe mantenimiento sólo cuando se produce un fallo o avería para el restablecimiento a las condiciones de operación deseadas. Este es el llamado mantenimiento curativo o de emergencia.

El principal punto débil de esta estrategia es que no se tiene ningún control sobre la instalación. La máquina controla cuándo se ha de actuar. El 100% de las averías son no programadas, dejando a la suerte que el momento del fallo sea más o menos perjudicial.

En cuanto a los costes, probablemente aparezcan costes directos extras debido a horas extras y repuestos que no se dispongan y haya que conseguir a cualquier precio si la máquina es crítica.

Por otro lado, se presentarán unos costes indirectos, a considerar en cada caso, y que son todos aquellos derivados de una parada accidental: daños producidos en la instalación, material en curso deteriorado, aumento del consumo energético para el nuevo arranque, lucro cesante, retrasos en la entrega, penalizaciones, etc.

Sin embargo, es una estrategia que puede mostrarse eficaz para elementos de poca o nula responsabilidad y no críticos en el proceso productivo.

También el mantenimiento correctivo pertenece al grupo de mantenimientos reactivos. Este consiste en la realización de cambios en el montaje y la instalación de algunas partes de la máquina una vez que se detecta que estos provocan, de forma reiterada, una serie de averías.

Es importante indicar que el mantenimiento correctivo puede ser eficaz en base a una estrategia definida de mantenimiento diseñada bajo criterios rigurosos (criticidad, simulación, evaluación económica, otros). De igual manera, es importante acompañarlo con un plan de contingencia donde se contemplen diferentes escenarios de actuación que permitan dar una respuesta eficaz para garantizar los compromisos adquiridos.

El mantenimiento reactivo (curativo y correctivo) representa tradicionalmente unas dos terceras partes de las horas de trabajo dedicadas al mantenimiento. Las empresas con estructuras organizativas tradicionales siguen dedicando hoy la mayor parte de sus recursos a este tipo de mantenimiento.

A medida que los equipos tecnológicos se fueron sofisticando y aumentado los costes asociados a una interrupción de la producción, se fueron imponiendo las formas de mantenimiento preventivo; es difícil, por la naturaleza estocástica de las averías, que desaparezca el mantenimiento correctivo, el cual se utilizará como último recurso.

. Mantenimiento mejorativo.

Es una variante del mantenimiento reactivo. Consiste en la realización de mejoras de la geometría de las piezas con el fin, no sólo de reducir averías redundantes, sino también de mejorar el rendimiento de los equipos. Se diferencia del correctivo en que los cambios no se refieren al montaje o la posición de las piezas, sino a su propia estructura interna. Exige, por tanto, la realización de trabajos de ingeniería de manteni - miento que penetran en la arquitectura de la máquina y que requieren de la cooperación técnica fabricante-usuario.

. Mantenimiento Preventivo - Sistemático.

Consiste en la realización de tareas de mantenimiento programadas a intervalos regulares de tiempo, o bien, teniendo en cuenta el tiempo de funcionamiento: inspecciones, ajustes, limpieza, lubricación, calibraciones, reparaciones o reemplazo de componentes.

Su objetivo es reducir la probabilidad de fallo. Por tanto, la programación debe realizarse sobre la base del conocimiento profundo de la instalación y de la antigüedad (edad) de la misma, dado que su objetivo es programar las tareas buscando espaciar al máximo los tiempos de intervención y minimizar la probabilidad de averías. Es muy importante tener información sobre los elementos que componen las máquinas y el tiempo medio entre fallos (MTBF) para determinar el periodo entre tareas, así como anticiparse al fallo desde la experiencia que ya se tiene sobre la instalación.

Este mantenimiento se fundamenta en la *"curva de la bañera"*. La idea general es que una vez realizada la puesta en marcha, y supuesta bien ejecutada, existe un tiempo de funcionamiento durante el cual la probabilidad de fallo es baja hasta que llega un momento en que empieza a crecer, aumentando el riesgo de fallo. Este sería el momento

adecuado para el cambio del elemento. Esta curva (figura 30) es aplicable a elementos mecánicos.

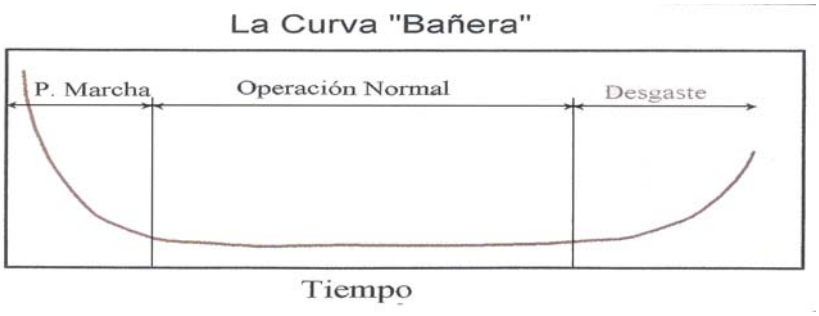


Figura 30: Curva de la bañera.

El mantenimiento preventivo - sistemático se muestra eficaz en las tareas de revisión, limpieza y en elementos mecánicos en los que la relación tiempo en servicio – fiabilidad sea bien conocida. Muestra su punto débil en que el tiempo establecido entre tareas está predefinido y está basado en "tiempos medios" entre fallos. El "tiempo medio" es un valor teórico que se obtiene como resultado a un cálculo. La mayor probabilidad la tenemos en que el tiempo en el que el componente va a fallar sea mayor o menor que ese tiempo medio. Por otra parte, es necesaria la mayor seguridad de que la avería no ocurra, lo que lleva a ser conservadores en el periodo y acortarlo. En definitiva, se recurre al sobremantenimiento. Este mantenimiento puede ser caro e inefectivo si es la única estrategia de mantenimiento que se utiliza.

Según un estudio estadístico realizado en EE.U.U. (donde en este tema se está más avanzado que en Europa), la distribución del mantenimiento es:

- 65% mantenimiento correctivo.
- 30% mantenimiento preventivo.
- 5% mantenimiento predictivo.

El estudio concluye que el 60% del 30% del mantenimiento preventivo resultó innecesario.

Por otra parte, y desde el punto de vista de la gestión de activos físicos, este mantenimiento es una herramienta muy útil si se acompaña de un GMAO.

La creciente incorporación de sensores microelectrónicos en la estructura interna de los equipos permite obtener una información, en tiempo real, del proceso de desgaste efectivo de una serie de piezas y componentes críticos. Ello ayuda a salvar la diferencia que existe entre el *"desgaste teórico"* y el *"desgaste real"*.

La información de valores físicos derivados de la medición de la presión, la temperatura, el ruido y las vibraciones de los equipos permite realizar un seguimiento más directo, y en tiempo real, del proceso de desgaste. Esto da cobertura a una nueva forma de mantenimiento denominado predictivo o condicional. El sistema permite ajustar y organizar los procesos de mantenimiento preventivo a la evolución del desgaste real, lo cual permite reducir los efectos del sobremantenimiento (cambios innecesarios de piezas, revisiones preventivas rutinarias, tiempos y costes, etc.)

. Mantenimiento Predictivo. Mantenimiento Preventivo por Condición.

También llamado *"Mantenimiento basado en la condición (CBM)"*. Consiste en la aplicación de técnicas no intrusivas que permiten evaluar el estado de las máquinas en función de un parámetro (condición); en función de este valor, y atendiendo a los intervalos considerados de tolerancia, se planifican y programan las intervenciones necesarias de mantenimiento a nivel correctivo o preventivo. Engloba un amplio abanico de tecnologías (termografía, análisis de aceites, ultrasonido, análisis de vibraciones, etc.).

El objetivo de este mantenimiento es la detección precoz de causas de fallos en máquinas, de modo que se pueda actuar antes de que el fallo ocurra. El fallo no será algo imprevisto, sino que se estará preparado para actuar en caso de que no se pueda, o no interese, evitar (simulación de escenarios para la definición de planes de contin - gencia).

Este tipo de mantenimiento consiste en tomar una serie de parámetros de las máquinas, y del entorno, analizarlos y compararlos (con los datos anteriores, o con un catálogo de fallos, si existe para la tecnología y el elemento sometido a control), analizar la tendencia, establecer límites admisibles y, finalmente, diagnosticar el estado de la máquina y la recomendación de intervención más adecuada.

Para que esta técnica sea eficaz es necesario que el defecto se detecte antes de que adquiera dimensiones alarmantes. Ello exige, para poder realizar diagnósticos fiables, no sólo conocer los fundamentos y conceptos teóricos que sustentan el método cien - tífico (Principios de las Transformadas de Laplace, Series de Fourier, Transformada rápida de Fourier, etc.) sino también seleccionar la técnica y el equipo/s que mejor respuesta de al problema de control en estudio.

Esta estrategia exige procesos de trabajo más sistemáticos y científico - técnicos con menos contenido empírico-práctico que el preventivo sistemático. La experiencia práctica acumulada seguirá siendo decisiva a la hora de determinar, por ejemplo, dónde se instala un sensor, qué parámetros medir, los rangos de tolerancia, etc.

Esta técnica se está introduciendo actualmente en gran número de instalaciones industriales para seguir el estado de funcionamiento de máquinas críticas en el proceso.

Una buena estrategia de mantenimiento no estaría configurada únicamente por predictivo como forma de actuar, ya que, además del elevado coste que supondría, con las técnicas actuales disponibles no es posible llegar a todos los elementos operativos.

El análisis de vibraciones es quizás la técnica que más se identifica con este tipo de mantenimiento, especialmente vibraciones en máquinas rotativas. Sin embargo, es importante huir de este mito, ya que el mantenimiento predictivo es todo aquello que permite predecir o detectar la proximidad de un fallo. Esta idea es la que realmente hace factible la aplicación, o no, de una estrategia de mantenimiento de este tipo. Aquí se abre un importante campo de investigación en la búsqueda de parámetros (indicadores) o clusters de indicadores, que tengan el suficiente peso como para convertirse en “trazadores”, “marcadores” o predictores del fallo.

El mantenimiento predictivo se muestra eficaz si produce una eliminación de tareas de correctivo y una drástica reducción de tareas de preventivo innecesarias. Este tipo de mantenimiento permite reducir el sobremantenimiento y aumentar la fiabilidad de la instalación.

A la hora de diseñar un programa de mantenimiento predictivo es fundamental seleccionar la maquinaria objeto de este tipo de mantenimiento. Esta selección deberá atender a criterios de criticidad, seguridad, máquinas con alta frecuencia de fallos, máquinas con altos costes de mantenimiento preventivo, máquinas que son difíciles de reparar, etc. Normalmente, el personal de mantenimiento de las plantas de producción tiene perfectamente identificadas, en su mente, cuáles son las máquinas críticas; es decir, cuáles son aquellas máquinas que si se averían provocan un problema grave (seguridad, medio ambiente, producción). Para un diseño eficaz y eficiente del programa de mantenimiento, y como primera etapa, es necesario extraer esta información mediante la utilización de técnicas apropiadas (normalmente expansivas /cualitativas), con objeto de que esté documentada y pueda ser utilizada.

Un método sencillo, rápido, y económico, de identificación y clasificación de los niveles de criticidad, es el desarrollo de sesiones de trabajo en equipo en las que se

utilice la matriz de criticidad (figura 31) para establecer los niveles críticos (alto, medio y bajo) de las máquinas en función de la definición actual del proceso.

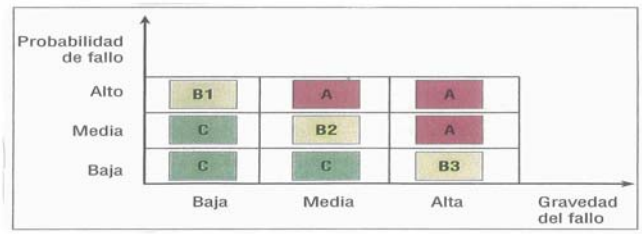


Figura 31: Matriz de criticidad.

Para el éxito/productividad de las sesiones, es necesario tener un plan y unos objetivos a alcanzar que estén perfectamente definidos, como por ejemplo: mejorar el uptime de las instalaciones, reducir el downtime, reducir el número de intervenciones de emergencia o no programadas, espaciar más las paradas programadas, reducir el nivel de inventario de repuestos en almacén, reducir el nivel de equipamiento redundante, reducir las pérdidas de material y los rechazos por incumplimiento de calidad, etc.

Estos objetivos deben estar cuantificados, de modo que su medida y la sensibilidad sobre los logros obtenidos sean objetivas.

Una de las principales dificultades que aparecen en la práctica a la hora de valorar el éxito de estos programas es la falta de información histórica; resulta complicado establecer unos objetivos de mejora cuando no se conoce la referencia de partida.

. Mantenimiento Proactivo.

Contempla los anteriores tipos de mantenimiento y presta especial atención a las consecuencias de las averías con el fin de minimizar sus efectos. Es un paso más. Dentro de la filosofía del RCM (Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad), el manteni - miento proactivo supone la culminación de esta filosofía. Es una metodología basada en el análisis "causa – efecto" que tiene muy en cuenta la consecuencia del fallo. En los anteriores tipos de estrategia de mantenimiento sólo se tenía en cuenta la máquina. Aquí, la visión es global: se tiene en cuenta la máquina, lo que hace, qué pasa si falla, de qué formas distintas puede fallar, atiende a la detección de posibles defectos ocultos en la máquina y sus consecuencias, combina las estrategias de mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo, asesora en los momentos de las especificaciones de compra y montaje, etc.

Evidentemente, el mantenimiento correctivo (curativo) no se puede eliminar; cuando algo se rompe, por la razón que sea, hay que repararlo; pero, por otra parte, y dependiendo de la criticidad o de la importancia relativa de la máquina, habrá ocasiones en que la decisión más rentable pueda ser dejar que algo funcione hasta que se rompa, bien porque el fallo no produzca una perturbación grave, porque tenemos equipo redundante de cambio automático, etc. En cualquier caso, y desde el enfoque del mantenimiento proactivo, esta ha de ser una "decisión activa" consecuencia de una reflexión previa sobre la máquina y la evaluación de las consecuencias de sus posibles averías, y no un hecho"pasivo",en que se haya dejado fallar porque no se había pensado en ello.

Teniendo en cuenta la actuación del mantenimiento sobre elementos o máquinas críticas, el planteamiento general debería ser:" *lo que se puede predecir se predice; lo que no se puede predecir, se previene; y lo que no se puede ni predecir ni prevenir, se debería rediseñar teniendo en cuenta que se trata de partes críticas de la instalación".*

. Mantenimiento Basado en el Riesgo (RBM- Risk Based Maintenance).

Es un mantenimiento que se define en base a los riesgos económicos, de seguridad y medioambientales asociados a los modos de fallo de un equipo/sistema.

En el Anexo III de este trabajo de tesis se recogen los estándares aplicables a los procesos de evaluación de riesgos y una guía básica para la planificación óptima de la función mantenimiento, en la fase de diseño, en base al análisis de riesgo.

B.2. Políticas básicas de mantenimiento.

Tomando como base los dos tipos de intervención de mantenimiento más genéricas, correctiva *(CM)* y preventiva *(PM)*, se pueden considerar cinco tipos de políticas de mantenimiento básicas:

(a) Mantenimiento Basado en el Fallo (FBM). Ordena realizar el mantenimiento sola - mente en el caso de ocurrencia de un fallo o avería. Por tanto, se trata de un mante - nimiento correctivo puro. Esta táctica será efectiva para aquellos supuestos donde las averías sean puramente aleatorias o de bajo coste (por ejemplo, si no producen parada).

(b) Mantenimiento Basado en el Uso (UBM). El manteniendo se realiza en función de un parámetro de uso: número de maniobras, una variable tiempo (un tiempo estimado de vida, un tiempo alcanzado en uso, otros). Este último caso es el llamado Manteni - miento de Periodo Fijo *(FPM).*

La táctica UBM asume que el comportamiento al fallo de los equipos es cono - cido, que la probabilidad de fallo de los equipos aumenta con el tiempo después de la última intervención (tipo IFR), y que el mantenimiento preventivo es más económico que el correctivo. La introducción en la década de los setenta de métodos que permitían medir el estado actual de los equipos y predecir el fallo hizo que esta técnica fuese reemplazada por el CBM.

(c) Mantenimiento Basado en la Condición (CBM). Ordena la intervención de manteni - miento cuando el valor de un parámetro dado del sistema alcanza o supera un valor preestablecido. Esta táctica asume que existe un parámetro del sistema que puede ser usado para predecir el comportamiento al fallo. Se trata de un mantenimiento predictivo. Las tradicionales rondas de inspección en planta (IBM- Mantenimiento Basado en la Inspección) representan, de hecho, la forma primitiva de CBM .Algunas referencias de interés son: Kelly, 1984 (enumera alguna de las técnicas más usadas de CBM) y Baldin, 1979 (describe, paso a paso, como implementar esta técnica en planta).

(d) Mantenimiento Basado en la Oportunidad (OBM). Utiliza la oportunidad de parada generada por el fallo de un componente para realizar el mantenimiento preventivo sobre otros componentes del sistema. La elección de componentes para esta oportunidad de mantenimiento se realiza en base a la distribución de probabilidad asociada a la vida residual, la cual puede verse influenciada por las condiciones de operación de los procesos (Vanneste,S.G.,1991).

(e) Mantenimiento en la fase de diseño (DOM: Design-out maintenance). Se centra en la mejora del diseño de los equipos con objeto de simplificar la operación de mantenimiento y aumentar la fiabilidad. Esta última política es de naturaleza diferente a las otras cuatro.

Los modelos matemáticos de optimización del mantenimiento suministran un análisis cuantitativo que equilibra la relación coste/beneficio de políticas alternativas de mantenimiento. El primer modelo apareció en los sesenta. Desde ese momento, varios artículos han sido publicados en este campo.

El óptimo consiste en seleccionar la política, o políticas (mix), que garantice el número mínimo de intervenciones necesarias que aseguren la disponibilidad deseada y la calidad de funcionamiento de cada uno de los componentes de los equipos (maximizar el uptime y minimizar el downtime y los costes de mantenimiento).

La realización de" demasiado preventivo" puede conducir al aumento de los costes de mantenimiento y a la reducción de capacidad debido al aumento de la frecuencia de las intervenciones de mantenimiento planificadas (downtime planificado). Por contra, el "déficit en preventivo" puede incrementar los costes relacionados con el mantenimiento debido al incremento de la frecuencia de las paradas no planificadas (downtime no planificado).

La función objetivo se establece sobre la base de minimizar los costes totales de operación de los equipos por unidad de tiempo o, maximizar la disponibilidad de uso. La optimización se realiza considerando un horizonte temporal infinito.

B.3. Tendencias. Método MSR (Maintenance Strategy Review): Revisión/aná - lisis de la estrategia de mantenimiento.

Para alcanzar los objetivos del negocio en un mercado extremadamente competitivo como el actual, es necesario actuar, de forma dinámica, sobre el sistema (planta) para que brinde los máximos resultados con los recursos óptimos. Al mismo tiempo, la sociedad moderna es menos tolerante con las consecuencias de las catástrofes industriales. La revisión de la estrategia de mantenimiento es una componente fundamental para la optimización a través de la identificación de oportunidades de mejora en la gestión de los procesos, de la eficiencia de una planta o activo físico. Las actividades de optimización del mantenimiento se suelen definir en base a un objetivo de reducción de costes. Como efectos colaterales evitan las penalizaciones potenciales derivadas de la falta de seguridad, disponibilidad y pérdida de rendimiento, resultado de un erróneo ejercicio de reducción de costes en mantenimiento. En la actualidad, se está implantando la idea de la *Gestión Dinámica de Activos,* donde el foco se orienta hacia la optimización a través de la mejora de los procesos para mejorar la seguridad, la disponibilidad y el rendimiento. Independientemente de que el foco se ponga sobre la reducción de costes o sobre la mejora de procesos, el paso inicial para un acertado análisis o revisión de la estrategia de mantenimiento debe ser la definición de la naturaleza y alcance del problema y la comprensión de los objetivos del negocio. Estos dos puntos servirán de base para:

(a) La *" racionalización financiera del programa de optimización del mantenimiento" (definición del ¿Por qué?).*

(b) Del punto anterior se deriva el *Cómo?,* que llevaría asociado una revisión detallada de la estrategia de gestión del mantenimiento para la *"racionalización técnica"* de la misma.

Es importante la selección de métodos/herramientas que permitan una revisión y evaluación sistemática de la planta o equipo en función a un contexto de mercado, un contexto operativo, de fallo, etc. para guiar las tareas de mantenimiento en base a:

(a) asegurar que están, y permanecen alineadas, con los objetivos del negocio,

(b) identificar estrategias de mantenimiento viables, técnica y económicamente, con respecto al nuevo contexto.

Las herramientas seleccionadas tendrán requerimientos en términos de instalación, recursos y datos, los cuales son esenciales para la precisión y validación del resultado. La selección de un método, o una combinación de ellos, será función del nivel de comprensión del funcionamiento de la planta y de las características de los datos disponibles para la realización del estudio. La estrategia concebida a través del *MSR* debe brindar mucho más que una lista de tareas de mantenimiento recomendadas. Debería brindar un plan comprensible que defina los síntomas, establezca un diagnóstico, proponga una gama de soluciones y permita hacer un seguimiento conti - nuo de la implementación para mejorar/calibrar los trabajos. Las fases claves serían:

• *Definición de los activos, el rendimiento requerido de los mismos, y los niveles de mantenimiento.* El establecimiento de los objetivos del análisis se realizará en términos de disponibilidad y eficiencia en sintonía con las metas del negocio.
• *Describir los sistemas y procedimientos para planificar y gestionar los trabajos de mantenimiento.* Es esencial :
- una buena documentación y comprensión de los procesos.
- Un detallado registro de activos. La precisión y completitud del registro debe estar garantizada antes de iniciar la revisión de los procesos.
• *Especificar los tipos de mantenimiento a ser realizados y por qué.*
• *Proponer los medios y recursos para la implementación.*
• *Indicar cualquier requerimiento en planta, equipo o repuesto.*
• *Perfilar los costes proyectados de las rutinas de mantenimiento (correctivo / pre - ventivo).*
• *Brindar una proyección de los principales remplazamientos en los próximos 5-10 años.*

Criterios básicos para la Selección de herramientas MSR.

Hay dos enfoques básicos a la hora de seleccionar las herramientas para la reali - zación del análisis:
(a) Uno recomienda realizar el análisis en base a una única herramienta.
(b) El otro plantea una solución formada por una combinación de herramientas (kit) trabajando conjuntamente que conjuguen, de forma armónica, la criticidad, el riesgo y los costes.

Se puede establecer una clasificación básica en base a las siguientes categorías:

- *Análisis basado en la experiencia.* Este tipo de análisis se aplica a equipos de bajo coste y poco críticos, en los que los parámetros de funcionamiento, fallo y requerimientos de mantenimiento son bien conocidos y establecidos.

Está basado en la experiencia y conocimiento del personal, la comprensión de los equipos, los requisitos de mantenimiento y el contexto operativo.

- *Análisis basado en la fiabilidad.* Se aplica a equipos de alta criticidad y donde la confianza en los datos de fallo y mantenimiento es baja o media. Busca el aseguramiento de la integridad técnica de los equipos. Analiza las funciones, los fallos funcionales, los modos de fallo y sus consecuencias. En base a esta información programa las actividades de mantenimiento apropiadas.
- *Análisis basado en el riesgo. Gestión dinámica del riesgo.* Se centra en la bús – queda del equilibrio óptimo entre el coste de las actividades de mantenimiento y el riesgo financiero de las consecuencias en caso de fallo. Exige un profundo conocimien - to de las condiciones de operación y datos fiables de alta calidad.

La Gestión Basada en el Riesgo es una variante del RCM (Reliability Centered Mainte - nance, en sus siglas en inglés) que determina el nivel de criticidad de una máquina a través de un proceso que cuantifica las consecuencias, a nivel operativo, de seguridad, y medioambiental, del fallo de un sistema en términos financieros.

El riesgo se define como el producto de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo y su nivel de criticidad (severidad). Las acciones de mantenimiento preventivo y predictivo son evaluadas, priorizadas y planificadas en base al riesgo asociado al modo de fallo. *(*Barrat, M., 2002)

El siguiente esquema (figura 32) muestra el proceso para la gestión de riesgos, del cual se extraen las bases para diseñar y actualizar el programa RBM (Risk Based Maintenance):

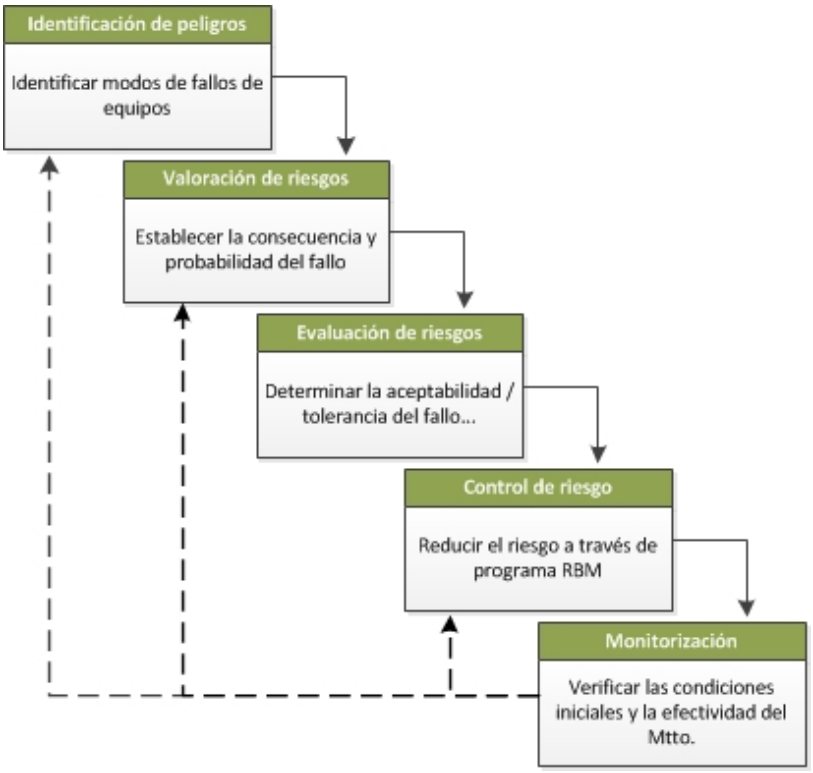


Figura 32: Proceso de gestión del riesgo (Barrat, M., 2003).

La cantidad de información requerida en la práctica para soportar un programa RBM obliga a la utilización de software. La figura 33 ilustra las entradas y salidas necesarias:

Figura 33: Resumen de entradas (inputs) – salidas (outputs) (Barrat,M., 2003).

Esta información es procesada por el software para construir el modelo de mantenimiento y de fiabilidad de la planta.

La tabla 10 muestra la comparación de herramientas MRS:

Tabla 10: Matriz de comparación de herramientas MRS (Henry, J., 2003).

	Basada en la Experiencia	***Basada en la Fiabilidad***	***Basada en el Riesgo***
Nivel de dependencia del dato	*Bajo*	*Medio*	*Alto*
Cualitativo / Cuantitativo	*Cualitativo*	*Cuantitativo*	*Cuantitativo*
Procesos SIL (Safety Integrity Level)	*No*	*No/Sí*	*Sí*
Tiempo requerido para realizar el análisis MRS	*Menor*	*Medio*	*Mayor*
Apropiada para proyectos nuevos (sin restricciones). Greenfield site/project	*Sí*	*Sí*	*Sí*
Apropiada para proyectos en vigor (revitalización, adaptación, reuso, ...) Brownfield site/project	*No*	*No*	*Sí*
Requiere conocimiento anterior	*Sí /subjetivo*	*Sí /subjetivo*	*Sí /objetivo*
Coste	*Menor*	*Medio*	*Mayor*

Es importante tener en cuenta que no hay soluciones inmutables o fijas a los problemas de mantenimiento. Luego, los análisis de la estrategia del mantenimiento basados en el riesgo o la fiabilidad deben ser contemplados como procesos vivos y dinámicos.

2.1.- 2.4. La organización en mantenimiento. Aspectos más relevantes.

La Función Mantenimiento debe estar orientada hacia el compromiso en la obtención de resultados y evolucionar hacia una *"ingeniería a corto"* asumiendo nuevas y diferentes responsabilidades que implican cambios a diferentes niveles: de organización, de control de costes e indicadores, de gestión y administración del personal, de gestión de las órdenes de correctivos, del diseño e implementación del preventivo, de la forma de articular los procesos para la mejora continua, de la recogida de datos, del empleo del GMAO y salida de información, de la aplicación de la fiabilidad y el mantenimiento predictivo, entre otros.

En este apartado se analiza, de forma resumida, una serie de temas relacionados con la organización del mantenimiento. Su consideración en el proceso de decisión, en la fase de diseño del modelo de gestión, permite beneficios notables a nivel de gestión y de reducción de costes.

Se destacan básicamente los siguientes:

2.1.-2.4 (a). Estructura organizativa.

Como idea general, hay que señalar la importancia que tiene para el correcto funcionamiento del Departamento de Mantenimiento el que esté dotado de una estructura organizativa adecuada a sus necesidades y al servicio que tiene que dar al resto de la organización. Se distinguen 6 aspectos a tener en cuenta en este campo:

A) Tipo de organigrama.

Debe estar adaptado a las particularidades del mantenimiento y de la empresa, con lo cual, no es posible establecer reglas generales ya que variará en función de la dimensión de la empresa(grande o pequeña), el volumen de trabajos y personal del departamento, incluso de la distancia física a los equipos e instalaciones (centralizado / descentralizado).

B) Oficios o especialidades.

En prácticamente todos los casos es conveniente desglosar los últimos escalones de la estructura organizativa en especialidades u oficios (Mecánica, Metalurgia, Electri -

cidad, Instrumentación, Obra Civil, Pintura, etc.). El nivel de desglose dependerá del volumen de los recursos humanos afectados y el grado de especialización de los mismos.

C) Supervisión.

Este es un aspecto esencial en una buena organización, por lo que es necesario diseñar el organigrama de Mantenimiento con un colectivo de Mandos de Taller y técnicos capaces de dar a los trabajos una supervisión suficiente en lo referente a la calidad del trabajo, el rendimiento y utilización de la mano de obra directa, la relación con los responsables de los contratistas (cuando haya trabajadores externos).

D) Contratación (outsourcing).

Habrá que considerar, en cualquier caso, la posible política de contratación externa de parte de los trabajos a realizar. Sin ahondar en este tema, habrá que evaluar los pros y los contras de una decisión de este tipo. Entre las ventajas, destacan la posibilidad de flexibilizar la plantilla de la empresa (para adaptarla en función de las cargas de trabajo, la demanda de trabajos especializados, etc.), mejorar la capacidad real, posibilitar la optimización del problema del backlog y la reducción de costes. Entre las desventajas, la pérdida de conocimiento (Know-how) y una probable dependencia real (tecnológica y económica) de los contratistas.

E) Relación con otros departamentos.

Es importante que el Departamento de Mantenimiento tenga un nivel adecuado dentro del organigrama de la empresa y no sea visto como un apéndice de cualquiera de los otros departamentos. Su relación con Fabricación, Ingeniería, Almacenes y Compras debe ser evidenciada y puesta en valor con objeto de poder dar soluciones globales.

F) Oficina de mantenimiento.

Deberá ocupar un lugar destacado dentro de la estructura de mantenimiento dado que su labor principal es garantizar la buena gestión del departamento. Sus funciones dependerán del volumen e implantación del mantenimiento realizado. Entre ellas contará con la planificación, petición de materiales y repuestos, presupuesto y segui - miento de costes, sistema de información, etc.

2.1.-2.4 (b). Planificación y programación de trabajos. Beneficios derivados.

Este apartado, frecuentemente olvidado y postergado por las" situaciones de urgencia frecuentes" en el desarrollo de las actividades propias del departamento, es una potencial fuente de ahorros y de mejora de la productividad.

Es frecuente que se confundan ambos términos. Para evitar esta situación es conveniente puntualizar ambos conceptos.

La Planificación es todo lo relativo a la definición del método o métodos de mantenimiento más adecuado/s para cada equipo y la preparación de los trabajos (sería un planteamiento a nivel macro: ¿Qué?, ¿Por qué? ¿Dónde? ¿Cuándo?).

La Programación organiza la secuencia de trabajos que se han de ejecutar en un periodo de tiempo determinado (nivel micro: ¿Cómo?, ¿Quién?).

A) Planificación.

En la preparación podría destacarse como cuestiones más importantes:

- La determinación, reserva o petición de los materiales y repuestos que se determinen como necesarios.
- La obtención del tiempo de realización del trabajo (requisito indispensable para una buena programación).
- La petición de trabajos complementarios a realizar por personas externas al departamento.
- La fijación y solicitud de recursos especiales (grúas, andamios,…).

B) Programación.

Partiendo del conjunto de trabajos ya planificados y listos para poderse realizar, la programación se encarga de organizar el programa o secuencia de ejecución de los mismos a lo largo del tiempo. Sólo puede verse alterada por aquellos trabajos que no estén planificados pero que deben realizarse inmediatamente por razones de urgencia.

Se distinguen dos tipos de programas:

- Uno a corto plazo, el cual cubre un periodo de una semana.
- Y otro, más complejo, a más largo plazo, dedicado especialmente a grandes trabajos y paradas generales.

Como se deduce, la programación es un proceso complejo que debe ser flexible y dinámico.

C) Beneficios derivados.

Dentro de los ahorros derivados de una buena planificación y programación destacan los siguientes:

- Reducción o eliminación de esperas (almacén, permisos de trabajo, disponibilidad de equipos e instalaciones, etc.).
- Equilibrado de los recursos, dada la posibilidad de cuantificar y justificar los recursos necesarios (posibilidad de valorar la necesidad de subcontratación externa). Como ventajas derivadas se obtienen: una reducción de las horas extras, una mejor utilización del personal de ejecución, mejora de la capacidad real del departamento, etc.
- Aumento de la disponibilidad.
- Mejora de la relación con fabricación.
- Realización de presupuestos realistas.
- Aumento de la productividad de los recursos humanos.
- Reducción del nivel de urgencias.
- Mejora del LCC.
- Etc.

2.1.-2.4 (c). Materiales y repuestos.

Una buena organización influye también en este capítulo.

A) Composición del almacén.

Un estudio en profundidad sobre los consumos de cada repuesto, su nivel de rotación, los plazos de reaprovisionamiento, etc. contribuyen a un dimensionamiento óptimo. Es necesario realizar, de forma periódica, análisis de materiales obsoletos y de baja rotación, así como de las rupturas de stocks.

B) Estrategias de suministro.

En orden a conseguir mejorar los plazos de reaprovisionamiento y la simplificación de los trámites en la realización de los pedidos es importante tener en cuenta las siguientes acciones:

- Seleccionar suministradores a nivel local, regional, nacional, internacional, etc.
- Acuerdos con proveedores para la creación de depósitos con disponibilidad inmediata.
- Establecimiento de lista de precios anuales.

C) Entregas a mantenimiento.

Para mejorar la productividad del personal de mantenimiento así como del almacén, cabe la posibilidad de organizar el despacho de materiales utilizando técnicas de RO para evitar las" puntas" de trabajo para que este se pueda repartir de una manera homogénea a lo largo de la jornada, tanto a nivel de taller como de punto de ejecución de los trabajos.

D) Codificación.

Es necesario diseñar una codificación adecuada de la mayor parte de los repuestos y materiales que se utilizan en mantenimiento para facilitar su identificación, petición y parametrización (stock mínimo, punto de pedido, precio, nivel de rotación, etc.). Se debe procurar que los materiales no codificados solicitados por mantenimiento no excedan de un 5 -10%.

2.1.-2.4 (d). Organización del trabajo.

De los aspectos organizativos que afectan a este capítulo se comentará básicamente los siguientes:

A) Circuito de la solicitud de trabajo.

Es fundamental que todo lo relacionado con la solicitud (orden de trabajo: O.T.) esté bien previsto y organizado desde el inicio hasta su finalización. Para ello, es necesario establecer un procedimiento donde estén perfectamente regulados temas como la emisión, la circulación y la aprobación de la O.T., los sucesivos estados por los que pasa, las causas de retraso o no ejecución de los trabajos, las prioridades, etc.

B) Histórico de equipos.

Se debe prestar especial atención a la cumplimentación de los informes de los trabajos realizados, dejando un registro codificado de las actuaciones efectuadas en los equipos. La finalidad es disponer de un elemento de consulta y análisis fiable para actuaciones de mejora (modificación del mantenimiento preventivo planificado, modi - ficación en los equipos para evitar las averías repetitivas o de elevado coste, etc.).

C) Carga de trabajo pendiente. El problema del backlog.

Debe poderse analizar tanto en su cuantía (volumen de horas de trabajo que representa) como en las causas que impide su ejecución (materiales, ingeniería, planificación, falta de mano de obra,…) con objeto de poder priorizar los trabajos y definir las acciones que se deben emprender para resolver las causas que producen la acumulación de trabajos no realizados.

D) Funciones de los mandos intermedios de taller.

Para el correcto funcionamiento de los trabajos de mantenimiento resulta fundamental establecer y delimitar las funciones de los mandos intermedios de los talleres. Destacar entre ellas:

- La determinación del trabajo a realizar en cada orden.
- La supervisión de los trabajos.
- La distribución de las OT entre los operarios.
- La programación a corto plazo.
- La corrección del histórico de los equipos.

2.1.-2.4 (e). Sistemas de información.

La organización de la información es básica para obtener unos buenos resultados en la gestión del mantenimiento. Tres aspectos a destacar:

A) Informatización de la gestión.

Temas como el circuito de la solicitud de trabajo, la reserva y petición de repuestos, la planificación, el lanzamiento del mantenimiento preventivo, el circuito de contratación (ofertas, pedidos, imputaciones) y el histórico de equipos, deben estar implantados en un soporte informático que permita acceder a la información de manera rápida y fiable con objeto de facilitar la toma de decisiones en el momento oportuno.

B) Conexión con otros departamentos.

Es importante establecer una comunicación sistemática, y a ser posible de forma informatizada, con el resto de los departamentos involucrados en el trabajo de manteni -

miento: compras y almacén (en lo relativo a suministro de materiales y repuestos) + fabricación (en temas como la emisión de solicitudes de trabajo y aprobación de los trabajos realizados, la programación y los permisos de trabajo, la situación de cada OT lanzada, etc.). La expresión:

Figura 34: Forma de entender la relación entre Mantenimiento y Fabricación.

debe definir la forma de entender las relaciones con el Departamento de fabricación.

No se trata de un matiz semántico. Ni mantenimiento está al servicio de fabricación ni a la inversa. Ambos deben considerar que están al servicio de producción.

C) Ratios de gestión.

Actúan como indicadores de navegación para la gestión. Su principal función es ayudar a corregir el rumbo cuando se detectan desviaciones de los valores marcados. Para una buena organización del mantenimiento es necesario establecer ratios para cada uno de los temas fundamentales: costes, planificación, contratación, disponibilidad, mantenimiento preventivo, etc.

2.2. Marco de referencia para el diseño del sistema de gestión del mantenimiento.

Los aspectos más importantes a considerar en la Gestión del Mantenimiento para su conciliación con las dinámicas impuestas por los ciclos de mercado y las nuevas tendencias y avances tecnológicos en producción son (figura 35):

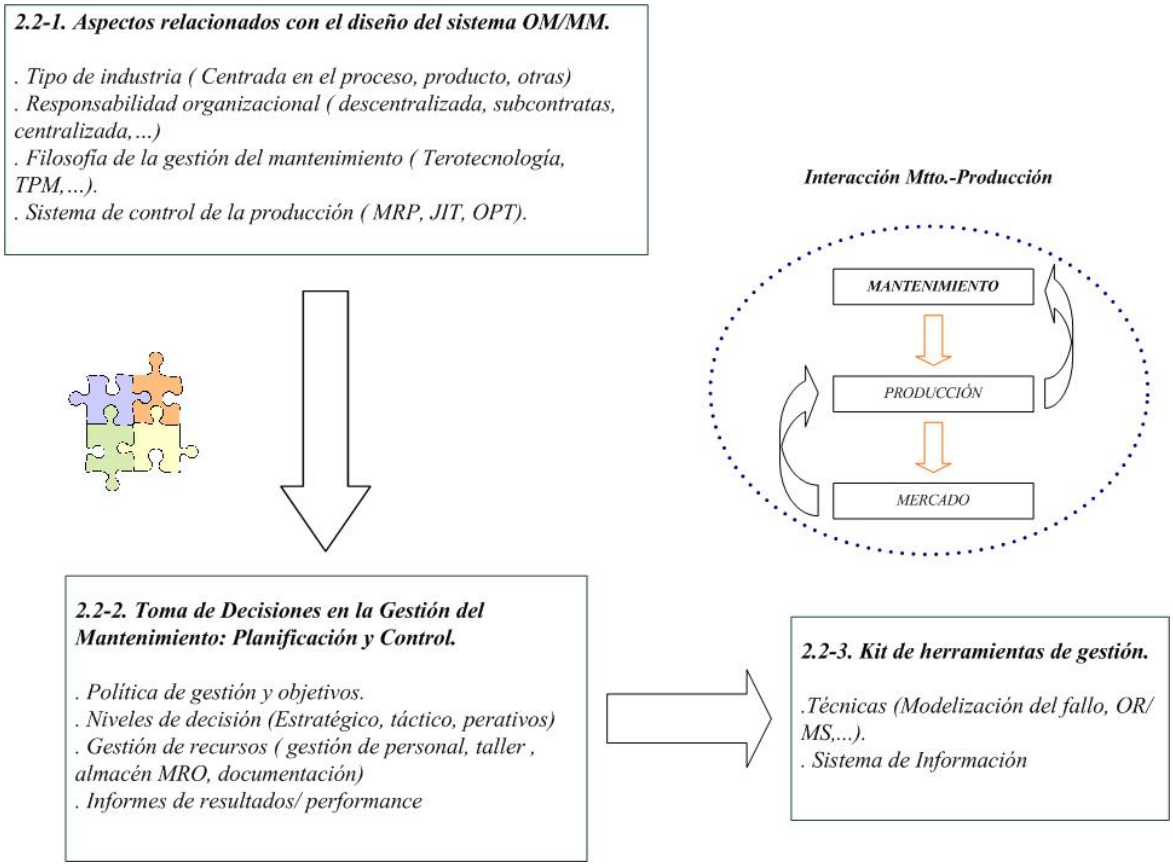


Figura 35: Esquema conceptual para la Gestión del Mantenimiento.
(Adaptado de L.Pintelon, L.F.Gelders, 1992).

Considerado el mantenimiento como una función que da soporte a producción a través de la gestión de operaciones, es importante tener en cuenta la interacción entre el sistema de control de la producción y el mantenimiento.

2.2.-1. Aspectos relacionados con el diseño del sistema OM/MM (Gestión de Operaciones/Gestión del Mantenimiento).

El éxito de cualquier negocio depende de los resultados (desempeño-performance) obtenidos al menos en tres funciones básicas: marketing, finanzas y operaciones /pro - ducción. La función principal de marketing es la generación de la demanda para los productos o servicios de la empresa. La de finanza, la generación, a corto y largo plazo, de los requerimientos de capital necesarios para dar soporte a las demandas de capital de las diferentes funciones del negocio. Y la función de producción/operación, es la fabricación/prestación de los productos/servicios que se adapten a la demanda del mercado. Estas funciones están muy interrelacionadas. Por ello, es importante que se coordinen las actividades vinculadas con dichas funciones y se establezcan unas estrategias y tácticas claras. El objetivo es que no se generen desequilibrios por la búsqueda de óptimos locales que perjudiquen los resultados globales de la organización.

La figura 36 muestra dónde se encardina la gestión de operaciones en el contexto del negocio y las diferentes áreas asociadas a la misma:

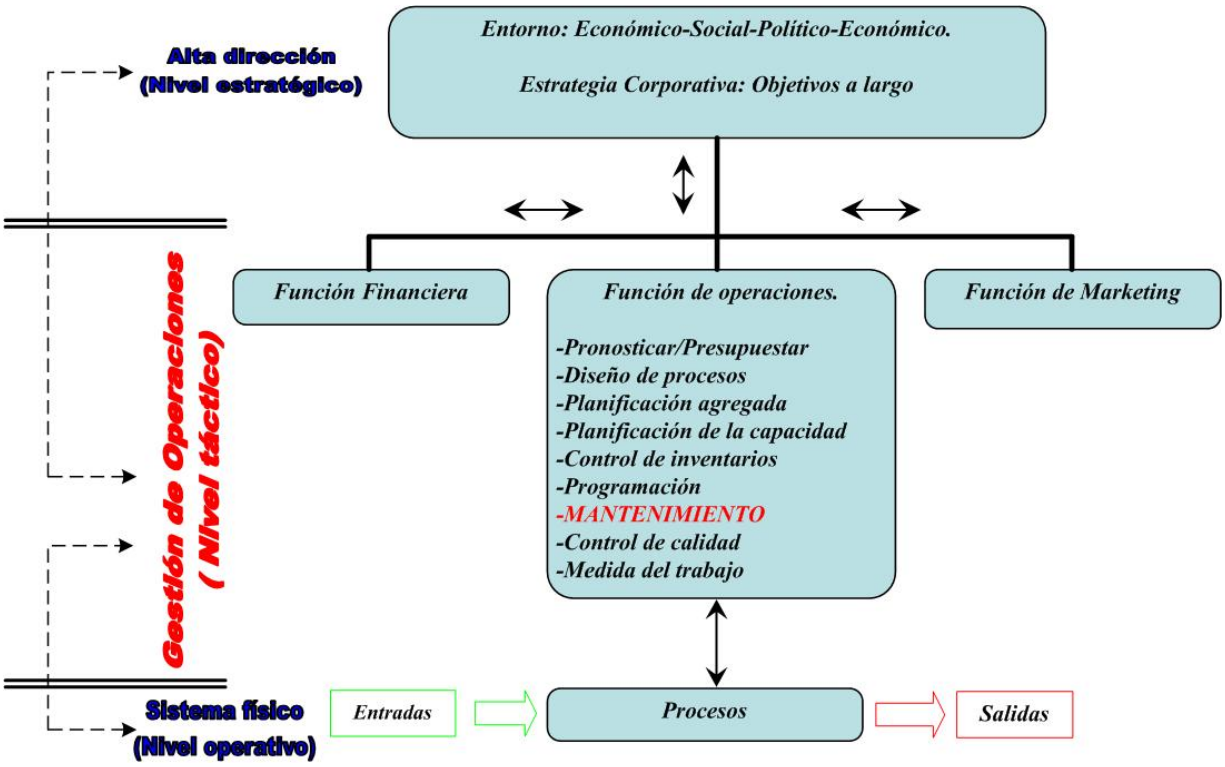


Figura 36: El mantenimiento en el contexto de la gestión de operaciones.

Una de las áreas vinculada a la función de operaciones es la gestión del mantenimiento. Los factores básicos a tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema OM/MM son:

2.2.-1.1. Tipo de industria.

A nivel corporativo, en las industrias de fabricación, la estrategia conecta con la Gestión de Operaciones (OM) a través de las decisiones adoptadas sobre los flujos de trabajo. La amplitud, alcance y nivel de competencia del mantenimiento será función del entorno en el que se desarrolla la gestión de operaciones en base a como esté

organizada la producción (centrada en el proceso, centrada en el producto, FMS, con equipos críticos redundantes en standby, organizada por módulos, etc.). Por tanto, es importante examinar las diferentes situaciones de fabricación, desde el punto de vista de la gestión del mantenimiento, con objeto de poder diseñar un sistema que dé respuesta eficiente a la estrategia OM.

Las dos estrategias extremas son: la centrada en el producto vs. centrada en el proceso.

Si la estrategia de producción está orientada al proceso *(estrategia centrada en el proceso)* preocupa menos el fallo de un equipo debido, básicamente, a los siguientes factores:

- Existe, en general, menos nivel de automatización que en un sistema centrado en el producto.
- La capacidad de producción instalada suele ser superior a la necesaria. Ello permite disponer de inventarios en curso que cubran la demanda en caso de avería o, acoplar a otra línea la producción de la línea fuera de servicio.
- Como los equipos suelen ser de propósito general, los trabajos pueden ser fácilmente reconducidos a otra unidad.
- El mantenimiento de un módulo de una línea no interrumpe la línea entera, con lo que la programación del mantenimiento preventivo es menos crítica.

Por el contrario, en un sistema orientado al producto *(estrategia centrada en el producto),* el fallo en una operación puede afectar al cierre de la línea, lo cual, no sólo genera tiempo improductivo (ocioso) del personal vinculado, sino que también, puede generar pérdida de material y oportunidades de negocio. Parece evidente, que esta estrategia exige programas de mantenimiento más eficientes con objeto de evitar redundancia de equipos, mejorar la fiabilidad de los equipos críticos, minimizar la frecuencia y duración de las averías, etc.

Un último tipo de estrategia es la basada en la organización por proyecto *(estrategia centrada en el proyecto).* Esta es utilizada por compañías que producen una variedad de productos personalizados que requieren de la entrada coordinada de una variedad de recursos (ejemplo, la construcción residencial). Diferentes tareas deben ser ejecutadas en un orden establecido, de manera que una avería imprevista puede producir serios retrasos en el proyecto global. Como la capacidad de utilización varía de proyecto a proyecto, resulta complicado generalizar el tipo de mantenimiento más idóneo.

2.2.-1.2. Tipo de organización.

La forma en como está organizada la empresa influye en el modo en que el mantenimiento opera. Los factores a tener en cuenta no serán los mismos entre una producción en planta compacta y otra en plantas dispersas. Por ejemplo, en un sistema de producción centralizado, la cuestión nuclear es dónde ubicar la función dentro del organigrama con objeto de definir los niveles de responsabilidad y dependencia: ¿Se introduce como una función que reporta al director de fábrica o de producción? La cuestión de quién debe informar de la gestión del mantenimiento no es simple de responder. Por el contrario, en un sistema de producción descentralizado, el modelo debe ser modificado con respecto al más efectivo centralizado con objeto de poder gestionar plantas que están dispersas (dimensión de las plantas, número de subplantas, distribución en planta, requerimiento de herramientas y capacidades, dimensión y distribución del personal,…).

Otro aspecto fundamental es el de la subcontratación. En particular, es importante la correcta asignación de las tareas a subcontratar (tareas demasiado complejas, demasiado especializadas, criterio ”hacer o subcontratar” en función del coste).

2.2.-1.3. Filosofía de gestión.

En los últimos veinte años se han desarrollado diferentes enfoques de la gestión del mantenimiento, según diferentes filosofías:

(a) Terotecnología.

Surge en la época de los setenta en el contexto gubernamental para la industria en el Reino Unido. Esta filosofía ofrece una visión de la ingeniería del mantenimiento combinación de gestión, ingeniería financiera y otras prácticas aplicadas a activos físicos en la búsqueda de economías del coste del ciclo de vida. Esta práctica está relacionada con:

- La especificación y diseño para la fiabilidad y mantenibilidad de plantas, maquinaria, equipos, construcciones y estructuras,
- Su instalación, puesta en servicio, mantenimiento, modificación y sustitución,
- Feedback de información sobre diseño (por ejemplo, en diseños modulares), rendimiento y costes.

Aunque el concepto es interesante, y ha recobrado cierta popularidad recientemente, no ha sido tenido muy en cuenta por parte de la industria debido a la falta de métodos y técnicas prácticas.

Contribuyó a mejorar la conciencia sobre la importancia del mantenimiento.

Conceptos similares fueron también desarrollados en Alemania y Suecia. Sin embargo, no recibió atención en USA a pesar de que la idea del coste del ciclo de vida era bien conocida.

(b) TPM (Mantenimiento productivo Total).

Es un modelo cuyo planteamiento se centra en la gestión de los activos físicos. Entiende como básica la implicación del operario como responsable de la calidad del producto y la fiabilidad operativa. Fue definido por primera vez en 1971.

Es una filosofía de gestión japonesa conformada, en gran parte, por una variedad de estructuras y prácticas de gestión no japonesas adaptadas a su cultura (Takahashi, 1981; Monden, 1986; Nakayima, 1989a y 1989b).

El objetivo es la maximización de la eficiencia y eficacia de los equipos por medio del incremento de la disponibilidad de los mismos a través del aumento de la calidad asegurada y el ahorro de trabajo como resultado de las modificaciones introducidas en planta. Para conseguir el objetivo se da prioridad a las inversiones en recursos humanos frente a las de capital. Busca la participación total de los trabajadores mediante el mantenimiento autónomo.

El TPM intenta reducir/eliminar diferentes tipos de perdidas que interfiere con la eficiencia de las operaciones en el sistema (Monden, 1985): paradas (por fallos, por ajustes, otras); pérdidas de velocidad; pérdidas por defectos (defectos en proceso, redu - cción en rendimiento).

Su objetivo es la búsqueda de la eficacia económica y la prevención del mantenimiento mediante el *"diseño orientado al mantenimiento"*.

El TPM se abre a la eficacia global atendiendo más a la operativa y a la actividad de mantenimiento, involucrando a los trabajadores.

Este modelo no sólo ha tenido un gran éxito en Japón, sino que también ha despertado un gran interés en otros países, y especialmente, en conexión con las técnicas de *JIT (Just-In-Time).*

Será de difícil aplicación en empresas con un bajo nivel de automatización y que por tanto, requiera la asistencia constante de los operadores.

Una de las cuestiones que más reticencia genera en la gerencia, dirección general y dirección de producción, es pensar que al involucrar en temas de mantenimiento al per -

sonal de producción, se relajen las funciones que los operadores tienen asignadas a producción y que ello pueda generar más inconvenientes que ventajas.

Uno de los puntos más delicados es la configuración de los *"grupos autónomos de mantenimiento"*.Esta tarea es tanto más difícil cuanto mayor haya sido en la empresa la división del trabajo entre producción y mantenimiento. Su implantación en una empresa medio grande, sin demasiada conflictividad, puede requerir de dos a tres años.

(c) Otras filosofías.

Destacan, principalmente, el *RCM (Reliability Centred Maintenance), CBM (Condition Based Maintenance) y Asset management.*

- *RCM.*

El RCM surgió en el marco de las Fuerzas Aéreas de USA y se está aplicando al sector industrial con ligeras adaptaciones. Este modelo identifica los requerimientos de mantenimiento a través de diagramas de decisión específicos que orientan sobre la política de mantenimiento más apropiada.

Está basada en la fiabilidad y surge en los sesenta como respuesta a los problemas que preocupaban en aquel momento: crecientes costes de mantenimiento, bajos niveles de disponibilidad, baja efectividad del mantenimiento preventivo, etc.

Básicamente utiliza los conocimientos y experiencia del personal de mantenimiento y de producción para identificar, a partir de las metas de producción, los requerimientos de mantenimiento de cada unidad operativa y optimizar los rendimientos de esas unidades. Busca metas de productividad mejorando la implantación y las políticas basadas en los cálculos de la fiabilidad de diseño.

- *CBM.*

Consiste en la aplicación de técnicas no intrusivas que permiten evaluar el estado de las máquinas en función de un parámetro (condición); en función de este valor, y aten - diendo a los intervalos considerados de tolerancia, se planifican y programan las intervenciones necesarias de mantenimiento a nivel correctivo o preventivo. Engloba un amplio abanico de tecnologías (termografía, análisis de aceites, ultrasonido, análisis de vibraciones, etc.).

Esta técnica se está introduciendo actualmente en gran número de instalaciones industriales para seguir el estado de funcionamiento de máquinas críticas en el proceso.

El análisis de vibraciones es quizás la técnica que más se identifica con este tipo de mantenimiento, especialmente vibraciones en máquinas rotativas.

- *Asset Management.*

La Asset Management fue desarrollada en Alemania y Australia y toma la aproximación del ciclo de vida para equipos (Maennel, 1982; Oberhofer, 1978).

La terotecnología y el TPM están más orientados hacia los aspectos relacionados con la ingeniería, mientras que estos otros modelos ponen el énfasis sobre los aspectos económicos y financieros.

2.2.-1.4. Sistema de control de la producción: Interacción mantenimiento - control de la producción.

Considerado el mantenimiento como una función que da soporte a producción a través de la gestión de operaciones, es importante tener en cuenta la interacción entre el sistema de control de la producción y el mantenimiento (figura 37):

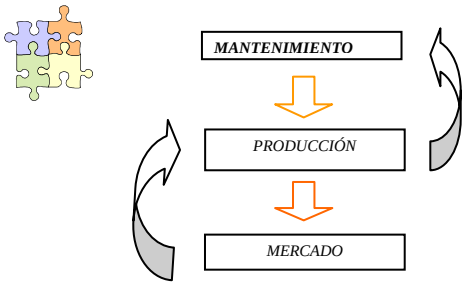


Figura 37: Interacción Mantenimiento-Producción.

(a) Filosofía MRP (Manufacturing Resources Planning).

El MRP *(Planificación de los Recursos de Producción)* reclama ser un sistema de control de producción integral; por lo tanto, la función mantenimiento debe ser incorporada al modelo.

Originalmente, esta filosofía no consideraba, de forma explícita, aspectos relacionados con el mantenimiento. Intenta resolver determinadas situaciones como los desechos, averías a través de inventarios (”buffer”). Probablemente, el mantenimiento preventivo no recibió especial atención debido al hecho de que el desarrollo del MRP se inició en entornos donde las averías eran menos disruptivas.

No está conceptuada como una buena herramienta para planificar a corto los trabajos de mantenimiento y planificación de personal (equipos) debido a su falta de flexibilidad.

(b) Filosofía JIT (Just- in- Time: Justo a tiempo).

El éxito en la implementación de esta filosofía se traduce en la reducción de los niveles de inventarios y trabajos en curso (optimización de los recursos financieros). Por tanto, los sistemas de producción serán mucho más vulnerables a las averías. Cuando una máquina se avería las subsiguientes quedan privadas de trabajo. Por consiguiente, son muy importantes las mejoras en los procesos de producción y la gestión del mantenimiento. El JIT trata de resolver los problemas, tanto a nivel técnico como organizativo, en vez de camuflarlos bajo un largo stocks de seguridad. Frente a los enfoques tradicionales, como el MRP, trata de mejorar la fiabilidad de los equipos mediante una correcta planificación y programación del mantenimiento en vez de ocultarla detrás de los inventarios en espera (“buffer”). Esta filosofía está normalmente relacionada con el TPM.

Algunas modificaciones en la gestión del mantenimiento en la fase de implementa - ción del JIT son recogidas en Voss (1989) y O’Grady (1988).

En un sistema de producción JIT, la simulación es utilizada principalmente con dos fines básicos:

- *Para el control de producción.* El modelo permite predecir fluctuaciones en el trabajo en curso en función de la disponibilidad y capacidad de la planta, o viceversa.
- *Para la planificación del mantenimiento y la prevención de averías.* Un modelo de simulación puede ser usado para predecir el impacto que una avería en un elemento del sistema puede producir “aguas abajo”, en términos de frecuencia, duración y número de operaciones afectadas, lo cual permite priorizar áreas de actuación.

(c) OPT (Optimized Production Technology).

Este modelo se aproxima y está relacionado con la Teoría de las Restricciones (Fox, 1982; Goldrad, 1986 a y b, 1988; Koizol, 1988). Es una mezcla de MRP y JIT. Identifica los cuellos de botella mediante simulaciones de ordenador a través de ensayos "prueba-error" de los procesos en planta. La respuesta/solución a los cuellos de botella puede ser brindada eliminando el problema (JIT) o camuflándolo (MRP).Ambas alternativas pueden ser modeladas bajo el enfoque OPT, de modo que la dirección puede valorar el impacto de cada una de ellas y seleccionar el curso de acción más apropiado. Otro aspecto importante de esta filosofía es que se centra sobre acciones de efectos globales; es decir, que mejoran totalmente el sistema: tiempo total de proceso, inventario total, coste total de operación.

El enfoque de "cuellos de botella" de la filosofía OPT puede ser extendido a la gestión del mantenimiento en la fase de planificación. Un criterio válido para priorizar la reparación de averías o la planificación del mantenimiento preventivo podría ser diseñado sobre la base de una clara distinción entre recursos que actúan como cuellos de botella o no.

Las estructuras de los sistemas de información que soportan este modelo (Gelders y Van Wassenhove, 1984) son más flexibles a la hora de programar y reprogramar que los sistemas que soportan un MRP, lo cual resulta útil en el caso de averías en máquinas principales. El OPT rompe con las medidas de contabilidad tradicionales y propone unas más globales orientadas hacia la medida del rendimiento. Esta modificación ayuda a incorporar unos costes de mantenimiento más reales que los que brinda los sistemas tradicionales.

2.2.-2. Toma de decisiones en Mantenimiento. Niveles de decisión.

Los elementos en la toma de decisiones que serán discutidos en esta sección están relacionados con la planificación, la programación y el control. El análisis se centra en cuestiones vinculadas con la Gestión del Mantenimiento. Se analizan:

- Aspectos relacionados con la *política y objetivos* de la gestión del mantenimiento.
- Los diferentes *niveles de decisión*: estratégico, táctico y operativo.
- Forma de *gestionar los recursos* con objeto de lograr una implementación eficiente y efectiva de las decisiones (personal, almacén MRO, documentación,…)
- Los *informes de funcionamiento*; cierran el lazo de las actividades de gestión.

No se abordan aspectos técnicos tales como tecnología del mantenimiento (técnicas para mejorar el mantenimiento, nuevas técnicas de reparación o monitoraje) o la teoría del diseño del mantenimiento (estudio de avances tecnológicos en el diseño de equipos que favorezcan la mantenibilidad y el comportamiento al fallo).

- *Política de gestión y objetivos.*

Para evitar la suboptimización, los objetivos de la gestión del mantenimiento deberían estar vinculados a los objetivos corporativos para que sean realistas y específicos. De este modo, podrían ser usados como guías para establecer metas cuya evaluación y alcance podrían ser cuantificadas mediante indicadores ad hoc.

Para tomar decisiones sobre la gestión del mantenimiento se considera necesario una metodología que brinde *una visión más global* de cuáles son los efectos de las mismas (acciones u omisiones) en mantenimiento y su impacto sobre los beneficios.

- *Niveles de decisión: estratégico, táctico, operativo.*

Las decisiones de gestión relacionadas con el mantenimiento de equipos (Anthony, 1965) se pueden establecer a largo plazo (estratégicas), a medio plazo (tácticas) o a corto plazo (operativas).

- *Planificación estratégica. Definición de objetivos a nivel corporativo.*

La planificación estratégica se centra en el suministro de los recursos de producción requeridos para asegurar la capacidad competitiva de la compañía. Dentro de esta planificación, se consideran aspectos tales como:

- Sustitución de equipos (Hsu, J.L., 1988).
- Cambios tecnológicos (Jones, 1987).
- Factores económicos (Tanchoco, 1987).
- Criterios de inversión.

Las decisiones son estudiadas sobre la base de modelos económicos. Fraser (1989) y Luxhoj (1986) presentan un marco de trabajo para asumir, de forma estructurada, una aproximación hacia esos modelos.

También están bastante estudiados los problemas de sustitución de equipos (Leung, 1987 y Stinson,1987, lo estudian en problemas en entornos con múltiples máquinas; Thomson, G.L., 1968; Christer, 1987c; Tapiero, 1979 ; Verheyen, 1979).

- *Planificación táctica. Planificación del mantenimiento.*

Trata de resolver el problema de la utilización efectiva de los recursos. Una planifi - cación apropiada del mantenimiento garantiza la fiabilidad y disponibilidad de los equipos de producción. La planificación táctica se centra básicamente en la búsqueda de óptimos: coste efectivo, política de mantenimiento, etc.

La figura 38 muestra la representación clásica de este proceso de optimización:

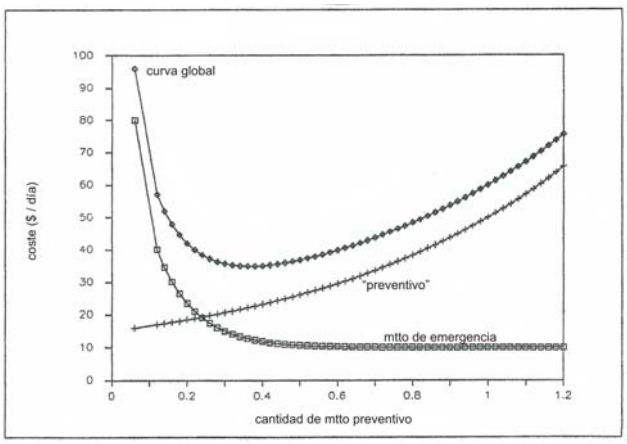


Figura 38: Comparación de los costes de mantenimiento para la planificación CM-PM.

En ella se recoge la evolución de los costes asociados a los dos tipos más genéricos de mantenimiento: el correctivo y el preventivo. La parte superior de la izquierda corresponde al mantenimiento puro de "emergencia" (correctivo puro: el equipo funciona hasta que deja de funcionar). Los costes de mantenimiento son los más altos debido a la frecuencia de las paradas no planificadas. El punto más alto a la derecha corresponde a lo que se denomina *"loving care"*, los que defienden que la fiabilidad es directamente proporcional a la frecuencia y cantidad de mantenimiento (Mantenimiento preventivo). Los elevados costes de mantenimiento se justifican por el elevado número de intervenciones programadas, lo que a su vez genera un efecto de segunda vuelta que es la reducción de la capacidad.

La curva superior muestra la combinación de ambas soluciones de mantenimiento.

- *Planificación operativa. Programación del mantenimiento planificado.*

A este nivel se trata con el día a día de la operación y con las decisiones relacionadas con la programación. La programación del mantenimiento trata con los problemas de priorización de la secuencia en la cual se realizarán las órdenes de trabajo y quién las ejecutará. Es necesario combinar las prioridades de los trabajos, la disponibilidad de los trabajadores, piezas de repuestos, herramientas y los equipos a ser mantenidos.

La programación es compleja debido a la naturaleza estocástica y dinámica de los trabajos de mantenimiento y la interrelación con producción.

Una programación efectiva del mantenimiento es importante en la práctica dado que ello permitirá:

- *El uso económico de los recursos* (optimización de la capacidad de la mano de obra de manteniendo y de la inversión en elementos de repuestos).
- *Garantizar la disponibilidad y fiabilidad deseada de los equipos,* lo que permite cumplir los objetivos de producción (en volumen, calidad y entrega a tiempo del producto).

El problema de la planificación del mantenimiento es mencionado en la mayoría de los libros de gestión del mantenimiento. En ninguno se brinda una estructura que contribuya a dar respuesta/solución a este complejo problema. Generalmente, lo que se brinda es un listado de los datos que resultan indispensables para una buena planificación o, la descripción del flujo de información organizacional desde que una orden de mantenimiento se solicita hasta que se ejecuta.

- *Gestión de recursos.*

Una acertada/competente gestión de los recursos es indispensable para una gestión efectiva del mantenimiento. Dentro de los recursos a gestionar cabe destacar: personal, materiales, taller de reparaciones e información. Para cada recurso existe la posibilidad de recurrir a fuentes internas o externas (subcontratación), o a una solución mixta.

- *Gestión de Personal.*

El aumento del nivel de sofisticación y automatización de los equipos, los avances tecnológicos, el aumento del impacto de las averías en los sistemas de producción adoptados, la reducción del nivel en inventario (buffer), etc., exige un aumento del nivel de cualificación técnica del personal de mantenimiento. Los trabajadores de mantenimiento necesitarán más capacidad de diagnóstico para hacer frente a equipos cada vez más complejos. Deberán saber utilizar sistemas de información que le brinden datos técnicos e históricos. Los puntos de discusión se centrarán en: seleccionar equipos de especialistas o generalistas, la motivación como forma de mejora de la productividad, el dimensionamiento de la fuerza de trabajo en función del contexto, oportunidades de carrera, otros.

- *Taller.*

Sus funciones básicas son la reparación de partes de equipos defectuosas o fabricar o modificar algunos repuestos especiales. Los modelos de planificación de un taller son muy similares a los de producción. Existen modelos para optimizar simultáneamente los niveles de inventario de recambios y el nivel de personal (Graves, 1988 y Kharola,1986).

- *Almacén MRO (Mantenimiento, Reparación, Operación).*

La gestión del almacén requiere de un nivel de repuestos y consumibles que garantice su disponibilidad. Incluye la gestión de herramientas especiales, petición y entrega de materiales, precios, petición y recepción de suministros. Existen numerosos modelos para la gestión de inventarios en almacenes con objeto de optimizar el capital inmovilizado.

- *Documentación.*

Los gerentes de mantenimiento son responsables de un gran número de activos (equipos) y de grandes inventarios de repuestos para mantener dichos activos. Se han ocupado de desarrollar métodos, contratar personas y comprar repuestos para mantener los activos.

La necesidad emergente de información técnica (partes de equipo, intercambiabili - dad de repuestos, secuencia de acople, desacople, historial de fallo) para alimentar a los sistema de información computerizados de ayuda a la gestión ha puesto a descubierto a *los **datos** como un nuevo activo.*

Otro elemento importante para una gestión eficaz son los ***procedimientos*** para las actividades de mantenimiento.

- *Informes de funcionamiento.*

La evaluación del funcionamiento es un elemento indispensable de la gestión del mantenimiento que cierra el lazo de control de la gestión. Los informes no sólo permiten evaluar cómo se están realizando las acciones planificadas sino también permiten anticiparse a los problemas e introducir mejoras de futuro. Es poca la literatura que trata este tema.

2.2.-3. Herramientas de gestión disponibles para la toma de decisiones en mantenimiento.

2.2-3.1. Kit de herramientas para el directivo.

En esta sección se analizan las herramientas de las que el directivo dispone para la toma de decisiones en mantenimiento. Esencialmente, se distinguen dos tipos de técnicas:

- *Técnicas de modelización del fallo.* Transforman los datos de fallo en parámetros útiles para gestionar el mantenimiento.
- *Técnicas OR/MS.* Se utilizan como soporte a la toma de decisiones en políticas de optimización.

▪ Técnicas de modelización del fallo. El dato como activo.

La mayoría de los modelos de optimización del mantenimiento presumen/suponen la disponibilidad de los datos. La realidad, es que en muchos casos no están disponibles datos correctos y apropiados. (Dekker, R., 1989)

Una serie de factores dificultan la obtención y la fiabilidad de los datos. Cabe mencionar, entre otros:

- *La interpretación subjetiva de los conceptos de fallo y reparación.* Este hecho dificulta la medida.
- *La traducción/conversión de sucesos en datos es a menudo primitiva.* Esto hace que muchos datos no sean fiables.
- *El largo tiempo requerido para recoger datos suficientes con objeto de que la muestra sea representativa* para poder hacer estimaciones fiables del comportamiento al fallo.
- *La frecuente modificación de los sistemas o subsistemas de producción,* lo que hace que los datos disponibles queden rápidamente obsoletos.
- *La escasez de datos a nivel de detalle de un componente.*
- *La incertidumbre* asociada a la hipótesis de que todos los modos de fallo se pueden considerar similares (Seidmann, 1989).

Un tratamiento riguroso de la modelización del fallo se puede encontrar en Gertsbakh, I.B. y Kordonskiy, K.B., 1969.

Una atención especial exige la definición y diseño de un sistema riguroso/fiable de recogida de datos y de procesamiento de los mismos.

El aumento en la implementación de Sistemas de Información de Gestión del Mantenimiento (MMIS) ha ido permitiendo una consulta y procesamiento de los datos de forma más eficiente y fiable.

La estadística básica necesaria para transformar datos de fallo en los parámetros de fallo requeridos para alimentar los modelos de optimización puede ser consultada en: Hookham, J. (1981); Mann.I. (1983a); O´Connor, P.D.T. (1991); Winter, J.L., Zakrzewski, R.S., y King, R.E. (1984).

Técnicas más avanzadas pueden ser encontradas en la literatura sobre estadística.

Las distribuciones de funciones de fallo a menudo usadas en los contextos de mantenimiento son la exponencial, la gamma, Weibull y la normal (truncada).

Un concepto popular en los estudios de mantenimiento y fiabilidad es la denominada" curva de bañera" (Jardine, 1970). El concepto ha sido muy criticado tam - bién (Ascher, 1984).

En estos modelos, el tipo de comportamiento del fallo es importante para la optimización de la política de mantenimiento.

- Técnicas OR/MS.

La Investigación Operativa (RO) y la Ciencia de Gestión (MS) están tan interrela - cionadas que es difícil distinguirlas por separado (Riggs, 1975). De hecho, la mayoría de los autores las distinguen en función del objeto: por su aplicación a áreas de negocio o técnicas matemáticas (ejemplos, Gillett, 1975 y Taha, 1982).

Cada vez es más frecuente la aparición de artículos que utilizan estas técnicas con objeto de optimizar decisiones específicas en mantenimiento.

Algunos describen la aplicación de un método OR/MS a un caso específico. Los modelos publicados muestran una perspectiva de la situación y revelan la complejidad en la toma de decisiones en mantenimiento; sin embargo, a menudo, no pueden ser generalizados.

Otros modelos tratan con un enfoque teórico problemas específicos y restringidos. A menudo, se centran en formulaciones matemáticas manejables más que sobre hipótesis relacionadas con situaciones reales en producción o mantenimiento.

Esos modelos brindan una idea del potencial de las técnicas y de las limitaciones para la modelización de las decisiones en mantenimiento. Su aplicabilidad práctica suele ser más bien limitada.

A pesar de que el hueco entre la teoría y la práctica en OR/MS se está estrechando lentamente, en lo que se refiere a la gestión del mantenimiento aún es muy grande, por varias razones:

- La principal, es que existe una falta de conocimiento de las herramientas dispo - nibles para la toma de decisiones. Ello es debido, básicamente, a que tradicionalmente la formación de los responsables de mantenimiento era principal y fundamentalmente técnica.
- Otro factor es la presión del tiempo sobre los responsables de mantenimiento; esto les impide disponer de tiempo adicional para el estudio de las técnicas de OR/MS y sus aplicaciones.
- Los problemas de mantenimiento tienen muchos aspectos que deben ser tenidos en consideración, lo que hace difícil formular modelos con carácter general.

En frente se sitúan, como complicaciones inherentes:

- ***El carácter estocástico*** de las actividades de mantenimiento (sucesos inespera – dos, incertidumbre acerca de los tiempos de procesamiento,…) .

- ***La carencia de datos apropiados***. El uso creciente de MMIS resulta prometedor para resolver este problema en el futuro y promover el uso de técnicas de decisión cuantitativas.

▪ Técnicas cuantitativas.

Diferentes técnicas cuantitativas podrían ser aplicadas a la gestión del mantenimiento. Entre las más importantes:

- *Deterministas (expansivos y contractivos).* Técnicas de optimización, como la programación lineal, la programación entera , la programación dinámica y la no lineal, pueden ser usadas para optimizar esquemas en mantenimiento preventivo*(* ejemplo, Jardine, 1970).
- *Teoría de la decisión de Markov y la teoría renovada.* Usada para optimizar el tiempo de funcionamiento (uptime) de los equipos (ej. , Ross,1985 y Tijms,1986).
- *Teoría de cola.* Usada para determinar el número óptimo de operarios en Taller (ej., Taha, 1982).
- *Simulación.* Para determinar el comportamiento de una línea de producción sometida a avería (ej., Philips, 1976).
- *Modelos de inventarios.* Para gestionar los inventarios de piezas de repuesto (ej. Silver, 1985).
- *Fiabilidad.* Para calcular y optimizar la fiabilidad de equipos sometidos a diferentes políticas de mantenimiento (ej., Barlow, 1975 y Gertsbakh, 1989).
- *PERT.* Para planificar las principales revisiones y cierres (ej., Niebel, 1985).
- *Teoría de juego y teoría de la decisión.* Para decidir entre varios cursos alterna – tivos de acciones en mantenimiento (ej., Patton, 1980).
- *Estudio del trabajo: UMS (Universal Maintenance Standards).* Fueron desarro – llados para mejorar la precisión en la estimación de los tiempos de procesamiento de trabajos (ej., Mann, 1983).

2.2.-3.2. Sistema de Información para la Gestión del Mantenimiento (MMIS).

El mundo del mantenimiento evoluciona de forma acompasada con la rapidez de evolución de las empresas; sus cambios se reflejan en sus objetivos, modelos organizativos, tecnologías aplicadas y utilización de las Tecnologías de la Información (TI), entre las cuales cabe destacar el empleo de los sistemas de Gestión del Mantenimiento Asistida por Ordenador (GMAO, en sus siglas en español).

La utilización/introducción de un programa de mantenimiento informatizado se realiza sobre la base de dos objetivos básicos:

- *Programación.* A nivel técnico, disponer de una herramienta que facilite la labor intrínseca de mantenimiento ayuda a programar los trabajos y facilita la información técnica para su ejecución. Disponer de una herramienta que aporte con rapidez la información técnica permite analizar cuál es la calidad del mantenimiento realizado, lo que facilita la toma de decisiones a nivel táctico y operativo.
- *Control.* A nivel económico, conocer cuál es el coste global y en qué equipos se utilizan los recursos, tanto humanos como materiales del departamento de Mantenimiento, es fundamental para los procesos de mejora continua.

La inversión en equipos de procesamiento de datos para la Gestión del Mantenimiento Asistida por Ordenador puede generar, según revela el estudio de los informes sobre sistemas computerizados de la gestión del mantenimiento, importantes beneficios, entre los que cabe destacar:

- *Mejora de la productividad y disponibilidad de los recursos:* personal propio y subcontratado, instalaciones y equipos (debido a una más eficaz y eficiente

planificación, programación y distribución y un mejor control de las órdenes de trabajo).

- *Mejor control del almacén MRO.* La posibilidad de disponer de una información más precisa, y en tiempo real, de los inventarios permite garantizar la disponibilidad de repuestos con stocks óptimos.
- *Mejor disponibilidad de datos técnicos e información histórica de mantenimiento* (actuaciones sobre equipos, averías, gamas de mantenimiento preventivo, análisis de causa de averías, modos de fallo, costes, etc.).
- *Suministro de indicadores válidos y necesarios para determinar las políticas de mantenimiento más adecuadas:* fiabilidades (en función de edades y modelos), tasas de fallos, grado de cumplimiento de los programas de mantenimiento, recursos humanos empleados, tiempos medios entre revisiones e incidencias, etc. Estos datos dan la posibilidad de valorar cuantitativamente la eficiencia y efectividad del mantenimiento, la identificación de equipos problemáticos (baja fiabilidad) o de mantenimiento costoso, la eficiencia de los distintos equipos de trabajo, etc. La obtención de índices es una de las aplicaciones más importantes de un sistema de información dado que resultan básicos para poder definir y valorar las políticas de mantenimiento de la empresa.
- *Como todo sistema mecanizado garantiza la integridad, protección y confiden - cialidad de los datos,* siendo responsabilidad de los Servicios Centrales la actua - lización de las librerías (gamas, criterios, etc.) y del personal operativo la introdu - cción de los datos de campo.
- *Facilitar la toma de decisiones de los responsables del mantenimiento.* Posibilidad de obtener diagnósticos y pronósticos de estado, determinación de las cargas de trabajo para poder planificar y programar de forma equilibrada, etc.
- *Agilidad en la evacuación de informes de funcionamiento.*

Como se comprueba, esta herramienta constituye un medio importante y eficaz para optimizar, en sentido amplio, la Función Mantenimiento. Uno de los objetivos básicos es conseguir la sistematización del mantenimiento y una correcta programación del mismo.

Son varios los autores que presentan modelos para justificar la gestión computerizada de la gestión del mantenimiento y el ahorro estimado (Mann, 1980; Mitchel, 1980; Pierce, 1986).

El primer Sistema de Información de Gestión del Mantenimiento apareció alrededor de 1980, coincidiendo con el reconocimiento de la importancia de la Función Mantenimiento dentro de las empresas. Inicialmente, las aplicaciones estaban limitadas a la contabilidad de costes y control de inventarios y centradas en la reducción de las tareas administrativas. Gradualmente, los paquetes MMIS iban incorporando aplica - ciones relacionadas con la toma de decisiones (control de órdenes de trabajo, planificación), aunque ninguna representaba realmente un apoyo a la toma de deci - siones. Podemos encontrar numerosos artículos sobre cuestiones como software MMIS "comprar-hacer"y sobre selección de hardware. La investigación sobre las aplicaciones existentes puede ser consultada en Basta (1985), Egol (1988), Jenkins (1988), Nelly (1984), Martín (1989), Smit (1983) y Winter (1984), entre otros.

La implementación de un sistema computerizado para la gestión del mantenimiento no es una tarea fácil. Casos sobre los estudios preliminares a la introducción de un sistema computerizado de la gestión del mantenimiento son abordados, para la industria belga, por De Bruyne (1985), De Cuyper (1986) y Helewaut (1986). Los primeros pasos previos a la implantación de un MMIS, son:

- *Definir los objetivos del sistema.*

- *Determinar los requerimientos básicos.*
- *Identificar la información necesaria para resolver el problema.*
- *Localizar la/s fuente/s de información.*
- *Establecer el sistema de recogida de los datos.*
- *Realizar un extenso análisis coste-beneficio de las combinaciones software - hardware posibles.*
- *Planificación rigurosa de la implantación de la combinación seleccionada.*
- *Formación apropiada a los usuarios del sistema.*

Estas etapas exigen una adaptación a la realidad y cultura de la organización y conectar con los objetivos corporativos y estratégicos para obtener el máximo potencial del sistema.

Igualmente importante es tener en cuenta uno de los pilares básicos de los sistemas de información: *el sistema de información no resuelve por sí mismo los problemas organizativos; en primer lugar, debe diseñarse la estructura organizacional y luego diseñar el sistema de información que sirva a esa estructura, y no a la inversa.*

Sin embargo, debe ser lo suficientemente flexible como para permitir hacer cambios en las políticas de gestión de los diferentes niveles organizacionales sin que ello afecte a la totalidad del sistema; sólo a los módulos que las implementan.

- Tendencias de futuro.

Las tendencias futuras están orientadas hacia una mayor exigencia de información actualizada que apoye la toma de decisiones para minimizar los costes integrales del mantenimiento. Los ejes básicos de actuación estarán centrados en:

- *El desarrollo de sistemas integrados de información que permitan un seguimiento completo a nivel técnico – económico.*
- *El desarrollo de elementos remotos que permitan obtener, de forma fiable, parámetros críticos de estado para el diagnóstico y pronóstico del estado de un equipo/instalación.*
- *El desarrollo de programas que permitan valorar diferentes alternativas de mantenimiento atendiendo a diferentes criterios (multicriterio).*

3. CONTRIBUCIONES. Principales factores para la estructuración y diseño de los modelos.

Del análisis realizado en este capítulo del estado del mantenimiento industrial se identifican, como factores directores para la definición y diseño de los modelos que hagan posible la gestión del mantenimiento sobre una base económica, los siguientes:

- Para la transición desde el enfoque tradicional hacia las nuevas políticas.

Del apartado 1.2 se extrae, que para la transición desde el enfoque tradicional hacia las nuevas políticas de mantenimiento, sería necesario:

- *Un cambio de mentalidad en la Alta Dirección.* Sería necesario un cambio cultural hacia una visión del mantenimiento como centro de beneficios más que como un mal inevitable. Esto llevaría asociado el poder traducir los resultados de la gestión del mantenimiento en términos económicos, generalmente financieros, para favorecer la comprensión y compromiso de la Alta dirección.
- *Traducción de los resultados de las acciones de mantenimiento al lenguaje gerencial (*Determinación del Retorno de la Inversión de las acciones de Mantenimiento: ROI_M).

  Varios trabajos han demostrado que el mantenimiento es una función estratégica y su influencia en casi todos los aspectos del rendimiento de una organización,

incluyendo competitividad (Madu, 2000), productividad (Raouf, 1994), calidad (Ben Daya y Duffuaa, 1995) y seguridad (Holmgren, 2005). Por tanto, la mejora de la efectividad del mantenimiento es muy importante.

Igualmente, se han propuesto diferentes enfoques para evaluar el rendimiento del mantenimiento con objeto de mejorar su efectividad (DeGroote, 1995; Pintelon y Puyvelde, 1997; Dwight, 1999; Tsang, 1998;Tsang et al.,1999;Yam et al.,2000; Kutucuoglu et al., 2001). Sin embargo, el impacto ha sido limitado por la dificultad de convencer a la Alta dirección de la necesidad de implementar esos enfoques en su organiza - ción cuando el resultado esperado de la mejora de la efectividad del mantenimiento no es evaluado en términos de beneficio financiero. Esta evaluación no es fácil de realizar, básicamente, por los siguientes motivos:

- Al ser considerada una función soporte de producción, sus efectos quedan absor- bidos por esta (Pintelon y Puyvelde, 1997).
- Por la inexistencia de trabajos científicos que permitan evaluar la contribución del mantenimiento a la creación de beneficio en la organización (ver, por ejemplo, Oke, 2005).

- *Diseñar políticas en términos dinámicos (LCP, Life Cycle Profit) más que en tér - minos estáticos (LCC, Life Cycle Cost).*
- *Orientarse hacia la Efectividad total.* Agregar a la eficiencia del mantenimiento interno, la efectividad externa relacionada con el mercado, como medida del rendimiento del mantenimiento.
- *Trabajar sobre la base de inductores de ingresos ("Revenue drivers") más que sobre inductores de costes ("Cost drivers").*El objetivo de cualquier estrategia de Mantenimiento debería estar encaminado a reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos, donde estaría especialmente centrado el "Beneficio derivado del Mantenimiento".
- *Introducir técnicas MCDA (Multiple Criteria Decision Analysis),* como el Cuadro de Mando Integral (BSC-Balance Scorecards- en sus siglas en inglés), ABM + ABC (Gestión Basada en Actividades en conjunción con Análisis de Costes Basado en Actividades), QFD (Quality Function Deployment),… que reemplacen la optimización simple del coste por una optimización multiobjetivo centrada en las componentes de valor y de coste total.
- *Desarrollo de modelos integradores:* factores económicos + estimación del riesgo + medida de la condición (conditioning monitoring) con objeto de decidir sobre la estrategia de mantenimiento óptima; producción + mantenimiento + calidad; JIT+ TQM + TPM; otros.
- *Construcción de Equipos multidisciplinares.* Colaboración entre los responsa - bles de las áreas de mantenimiento y optimización con los diseñadores de los sistemas de información para la integración de los MMIS con los modelos de optimización.
- *Definición y diseño de los modelos de gestión de activos en base a procesos en entornos dinámicos y turbulentos,* más que sobre el enfoque técnico conven - cional de "departamento de mantenimiento".

- Revisión de la literatura publicada sobre la gestión del mantenimiento.

Del diagnóstico realizado en el apartado 1.3., se extraen las siguientes conclusiones:

Bloque I: Generales.

- Un primer análisis del *"estado del arte"*de la gestión del mantenimiento en la literatura y la industria, evidencia que la gestión del mantenimiento es una importante y compleja función de gestión que, desafortunadamente, ha sido descuidada durante mucho tiempo, tanto en la práctica como en la investigación académica .(Amoaka - Gyampah, 1989; Chanin, 1979; Ford, 1987)
- La carencia de asignaturas específicas sobre mantenimiento en buena parte de los planes de estudio de las titulaciones de ingeniería, y el relativo bajo número de manuales y tratados publicados sobre tecnologías y gestión del mantenimiento, ha provocado un importante déficit informativo y formativo a los ingenieros, directivos y técnicos que desarrollan sus actividades en este campo.
- La gestión del mantenimiento ha sido descubierta y reconocida recientemente como una función importante de negocio. Esto justifica el interés que comienza a despertarse, tanto en el mundo académico como industrial, y que no existan "clásicos" de la literatura.
- La bibliografía consultada muestra modelos que están más centrados en el control administrativo (administración) que en la gestión de la función mantenimiento. **Poco ha sido escrito en cuanto a la forma de diseñar y estructurar esta función.**
- La gestión del mantenimiento es aún una función que está bastante desestructurada.
- Determinados aspectos hacen el problema de programación del mantenimiento más complejo que una programación de la producción. Por tanto, no es posible una programación eficiente sin la ayuda de herramientas de apoyo a la toma de decisiones.
- El mundo del mantenimiento carece de un modelo general apropiado que permita a los profesionales del mantenimiento, y a la Alta dirección, comprender y gestionar los procesos internos asociados a la función mantenimiento en sintonía con los objetivos del negocio. (Coetzee, J.L., 1997a)
- Los elementos esenciales para formular, de manera apropiada, un modelo serían:
  - *Un enfoque riguroso desde la perspectiva de la ingeniería/procesos.*
  - *Comprender la interacción existente entre mantenimiento y otras funciones, como producción.*
  - *Una clara visión e interpretación de las tasas de intercambio (trade off) implicadas en la gestión.*

(A1) Modelos de optimización del mantenimiento.

- Las principales causas que justifican el número reducido de aplicaciones son:
  - no contar con la opinión del *"propietario del problema"*a la hora de desarro – llar el modelo,
  - inadecuada definición/formulación del problema ,
  - falta de conocimiento/base (nivel económico , principios de optimización, con - ceptos estadísticos, otros) en los responsables de mantenimiento, los cuales se centran más en los aspectos de diseño del sistema que en el mantenimiento.
- *"Soluciones matemáticas elegantes"*. Los modelos se han desarrollado mas como medio y ejercicio matemático sobre la base de la disciplina de la RO que como fin.

Su aplicación ha sido muy limitada, por lo que su impacto sobre la toma de decisiones en la organización del mantenimiento ha sido también muy limitada.

- Es necesario más investigación para que los modelos matemáticos existentes contemplen las hipótesis reales de producción y mantenimiento. Igualmente es necesario su adaptación y ampliación para dar respuesta a otras demandas a nivel organizativo, técnico, financiero.
- *No es posible encontrar modelos generales que cubran todos los casos posibles*. El mantenimiento es un área que comprende una multitud de aspectos diferentes. Es un término genérico que se utiliza para referirse a una variedad de acciones sobre todo tipo de sistemas técnicos, los cuales se deterioran de formas diferentes.
- A pesar de que existen múltiples modelos, existe poco conocimiento sobre su aplicabilidad.
- Es necesario una unificación de los modelos existentes y una revisión crítica de su aplicabilidad, más que construir modelos nuevos.

(A2) Técnicas de mantenimiento.

- El fomento del análisis, la capacidad de coordinación y el aumento del uso del CMMS por personal externo a la función mantenimiento ayudaría a mejorar el interés por el mantenimiento , la sensibilidad por el estado/condición de los equipos y la mejora de la gestión y administración de las subcontratas.
- Un área de futuro es la definición de la /s política/s de subcontratación del mantenimiento debido a la necesidad estratégica de centrarse en lo que representa el núcleo del negocio.
- La elección y utilización de las técnicas de mantenimiento más adecuadas contribuye a la mejora de la eficiencia de la gestión, facilita la investigación metódica de fallos y reduce el coste del mantenimiento.

(A3) Programación del mantenimiento.

- Programación de la producción y programación del mantenimiento son conceptos diferentes que en la práctica tienden a asimilarse. Se distingue básicamente de la programación de la producción por su naturaleza estocástica.
- Esta confusión/simplificación es fuente de muchos problemas de organización: re - trasos en la ejecución de las órdenes de trabajo, información incompleta, trabajos ur- gentes, sobrecarga de trabajo en el departamento de mantenimiento, exceso de horas extras del personal de mantenimiento, conflictividad entre producción y manteni – miento.
- Necesidad de utilización de técnicas *"semicuantitativas"*.Un prerrequisito funda - mental para la programación eficiente de los trabajos de mantenimiento será el entendimiento mutuo y la cooperación entre las funciones de mantenimiento y producción, lo que indica la necesidad de utilización de técnicas "*semicuantitati - vas"*.
- La falta de una estructura es una de las principales causas que justifica la escasez de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la programación.
- Dado que el problema de la programación del mantenimiento presenta sus especificidades en función del caso, es difícil, si no imposible, establecer los requisitos exactos que ayuden a definir un "método general" que dé solución al problema.

- Dado el carácter dinámico y estocástico de la planificación, los modelos (algoritmos) a desarrollar para su optimización deberían ser interactivos y transparentes de cara al planificador (no "cajas negras") para permitir reprogramar la situación en función de acontecimientos fortuitos.
- Dificultad de una programación eficiente sin la ayuda de herramientas de apoyo a la toma de decisiones.

(A4) Medidas del desempeño (performance) del mantenimiento.

- Una cuestión que a menudo se presenta entre los responsables de mantenimiento es la necesidad de saber cómo lo están haciendo en comparación con la competencia. Existe la necesidad de disponer de una referencia (patrón) de medida que les permita evaluar su rendimiento/funcionamiento. Esta idea, aunque muy atractiva e interesante desde un punto de vista teórico, resulta poco realista desde un punto de vista práctico. Incluso adoptando las compañías de un mismo sector la misma definición para un determinado ratio, los factores propios que definen cada sistema (capacidad de producción, antigüedad, tecnología, entre otros)hacen que las cantidades no sean homogéneas, por lo que la utilidad de la comparación, como instrumento de gestión, es bastante limitada .
- Parida, A. y Kumar, U. establecen que para el éxito en la implementación y desa - rrollo de un Sistema MPM (Maintenance Performance Measurement) hay que obtener la implicación de todos los empleados involucrados, a la vez que considerar todos los aspectos relevantes que son necesarios ser considerados. Además, indican que el tradicional OEE utilizado por las compañías resulta inadecuado porque sólo mide la efectividad interna.
- Para medir la Efectividad total del mantenimiento hay que considerar ambas, la interna y la externa, a la vez que realizar una integración jerárquica e introducir indicadores del desempeño (performance) con un enfoque multicriterio.
- Los softwares comerciales no brindan una solución a los problemas de los informes de funcionamiento, aunque los MMIS (Sistemas de Información de la Gestión del Mantenimiento) se han popularizado mucho últimamente.
- La mayoría de los paquetes están adaptados para llevar un control a nivel adminis - trativo y contable. No suelen ser útiles como herramienta de gestión. También suce - de con los informes sobre instalaciones.
- La idea de un único conjunto de medidas de funcionamiento, como es a menudo sugerido tanto en la literatura como en la práctica, sería arriesgado al resultar muy rígido, simple y no muy útil para gestionar operaciones.

(A5) Sistemas de información del mantenimiento.

- *Los **datos** como activo.* La necesidad emergente de información técnica (partes de equipo, intercambiabilidad de repuestos, secuencia de acople, desacople, historial de fallo…) para alimentar a los sistema de información computerizados de ayuda a la gestión, ha puesto a descubierto a *los **datos** como un nuevo activo.*
- El desarrollo de las Tecnologías de la Información (TIC´s) contribuirá a la mejora de las prácticas en mantenimiento y a la mejora de la competitividad.
- Sin embargo, hay que tener en cuenta que la adquisición de software y hardware sofisticados no es la solución.

- Existe una necesidad real, en la práctica, de un sistema que sirva de apoyo al deci - sor para soportar, con criterios objetivos, la toma de decisiones en los diferentes niveles: estratégico, táctico y operativo.
- Se trata de definir un sistema más estructurado e integrado de lo que se conoce actualmente a través de la literatura, que cumpla con dos propósitos básicos:

a) Servir como herramienta para el equipo gestor (nivel operativo) para apoyar la toma de decisiones para reducir los costes integrales del mantenimiento.

b) Actuar como vehículo para la investigación en la toma de decisiones a nivel tác - tico y estratégico.

- Un sistema eficiente de información del funcionamiento debería cumplir tres requisitos básicos:

a) Informar, de forma fiable, rigurosa y en tiempo real, del funcionamiento de los aspectos vinculados al mantenimiento.

b) Ofrecer la oportunidad de realizar un análisis más detallado sobre la base de datos e información actualizados sin la necesidad de investigar demasiado tiempo.

c) Servir de herramienta de apoyo al decisor en el proceso de toma de decisiones de forma objetiva. Para alcanzar este tercer objetivo es necesario poder procesar, con base científica, los datos pertinentes con objeto de generar información útil para gestionar la situación objeto de estudio. Ello conllevará la *selección del kit de métodos científicos/analíticos adaptados a las necesidades definidas (Módulo a agregar a los sis temas MMIS y CMMS).*

- Para conseguir los objetivos anteriores, se requiere enlazar una base de datos (consistente, actualizada y bien gestionada), una documentación técnica actualizada y un kit de metodologías de carácter científico que permitan transformar los datos de en - trada en información relevante, fiable y actualizada, para el apoyo en la toma de de - cisiones en la búsqueda de soluciones efectivas y eficientes .
- En la práctica, son muy pocos los sistemas de información que satisfacen los requerimientos anteriores.
- Hoy en día, los ejecutivos de las compañías se enfrentan a una abundancia de información sobre aspectos relacionados con las diferentes funciones del negocio. Esta abundancia de datos resulta a veces difícil de abordar .
- También suele ser frecuente que la información llega a los gerentes con incorrecciones y desfasada.
- Aparentemente, el último paso en los sistemas de información suele ser omitido: la información está disponible, pero no es utilizable.
- Otra dificultad añadida a la elaboración de los informes de desempeño (performance) es su adaptación a las necesidades específicas del interlocutor(versatilidad). El ren - dimiento percibido del mantenimiento depende de la perspectiva del interlocutor: el contable pensará en términos de costos del mantenimiento; la Alta dirección está interesada en el rendimiento del presupuesto; los ingenieros están interesados en los aspectos técnicos; producción sobre la disponibilidad de los equipos; etc.
- Los gestores sufren más que de la pérdida de información relevante de una sobrea – bundancia de información irrelevante.
- La gestión efectiva y eficiente del mantenimiento requiere de la interacción con otras funciones del negocio.

(A6) Políticas de mantenimiento.

- La función mantenimiento debería estar integrada con otras funciones, como producción y control de calidad.
- La gestión del mantenimiento integrada asistida por ordenador (CIMM) es necesaria para compañías industriales con objeto de integrar programación con control de producción y mantenimiento.
- El diseño de un sistema apropiado que permita la integración de la gestión del mantenimiento en un MRPII sería de gran valor para mejorar el MRPII y reforzar la gestión logística de una organización.

Bloque II: Líneas futuras de investigación.

Las líneas futuras de investigación deberían ir dirigidas en las siguientes direcciones:

(A1) Modelos de optimización del mantenimiento.

- *Orientación a las aplicaciones y el usuario.* Existen un conjunto de problemas a la hora de aplicar los modelos que conlleva a que el grado de aplicación de los mismos sea muy limitado en la industria. Aparecen vinculados, básicamente, a la recogida y el análisis del dato :
    - Problemas con los datos de entrada.
    - Falta de un DSS (Sistemas de Soporte a la Decisión) para optimizar el mante – nimiento.
    - Distancia/gap entre teoría y práctica.
    - Imposibilidad de contar con modelos estándar por las especificidades pro - pias de los problemas de mantenimiento.
    - Diversidad de problemas no repetitivos.
    - Errores motivados por el análisis del dato sin conocimiento del mecanismo de fallo subyacente; etc.
- *Desarrollo DSS a nivel operativo.* Existen pocos trabajos orientados hacia el desa - rrollo de Sistemas de Soporte a la Decisión a nivel operativo.
- *Desarrollo de DSS en mantenimiento abiertos, interactivos y orientados al usuario.* La mayoría de los DSS en mantenimiento se comportan como" cajas negras".Cada problema de mantenimiento es probable que sea diferente, por lo que es el usuario, y no el sistema, el que debe validar el dato.
- *Construcción de modelos"semicuantitativos"*.Necesidad de integrar modelos cuali – tativos (RCM, TPM, otros) con cuantitativos.
- Es necesario una unificación de los modelos existentes y una revisión crítica de su aplicabilidad, más que construir modelos nuevos.
- Una línea actual de investigación está centrada en el desarrollo de modelos matemáticos de mantenimiento para estimar la fiabilidad de la medida y determinar las políticas de mantenimiento óptimas. Estos modelos serán útiles en la práctica para los ingenieros de mantenimiento, si son capaces de incorporar información acerca de: la reparación y estrategia de mantenimiento, gestión de políticas de inge - niería, los métodos de detección de fallos, mecanismos de fallo,...que justifiquen, de forma razonable, las asunciones adoptadas.
- Resulta interesante, como tema de investigación y para evitar la suboptimización, la búsqueda de nuevos modelos que combinen, de forma apropiada, elementos de las áreas de mantenimiento y producción (Modelo de "Óptimos anidados").

(A2) Técnicas de mantenimiento.

- *Diseño de CMMS* (Sistema computerizado de Gestión del Mantenimiento)de modo que esté unido al funcionamiento del mantenimiento.
- *Integración del RCM en el CMMS.* El RCM (Mantenimiento Centrado en la Fiabilidad) presenta el potencial de ser utilizado en un entorno automatizado.
- *Integración de técnicas existentes como el RCM, TPM.* El mantenimiento es visto, cada vez más, como una actividad multidisciplinar, lo que implicará la integración de técnicas. Este hecho se constata con en el desarrollo de técnicas emergentes como el ECM, SMM y RBM.

(A3) Programación del mantenimiento.

- *Definición y diseño de un sistema eficiente de gestión de la información*. Un aspecto importante es la ineficiencia del sistema y del flujo de información disponible para soportar la toma de decisiones (Oportunidad y calidad del dato/información). A menudo, la información se pierde o es incompleta y la presión del tiempo es demasiado grande como para permitir recoger aquellos datos perdidos antes de establecer la programación.
- *Necesidad de una categorización y codificación clara* , consensuada y compatible con el resto de los Sistemas de Información(S.I.)de los trabajos de mantenimiento que garantice la precisión y fiabilidad de los datos que alimentan el S.I..
- *Integración de varios modelos de programación en un MMIS (Sistema de Información para la Gestión del Mantenimiento)* para mejorar la efectividad de la planificación y programación de los trabajos de mantenimiento.
- *Definición y diseño de un sistema de priorización para resolver los problemas de backlog*. Un buen sistema de priorización ayudaría notablemente al director de mantenimiento a establecer una "secuencia aceptable" de ejecución de las órdenes de trabajo.

De los modelos de optimización hay dos que, particularmente, invitan a profundi - zar en la investigación. El primero de ellos, es el enfoque por itinerarios; la solución de este problema ayuda, no sólo, a la programación del mantenimiento en planta, sino que también contribuye a la solución de un problema que llama bastante la atención en la actualidad, que es la programación del personal de servicio técnico en campo.

El segundo, son los métodos para abordar la programación de recursos simultánea - mente. Lo atractivo de este enfoque es la solución de los problemas de suboptimización.

Como el problema de la programación del mantenimiento es muy complejo, un enfoque apropiado pasaría por el desarrollo de métodos heurísticos que den solución a problemas que se presentan en contextos industriales, más que centrarse en cuestiones muy teóricas.

(A4) Medidas del desempeño (performance) del mantenimiento.

- *Definición de "cluster de ratios"y sus rangos*. Un área de interés en la investigación es la definición de *"cluster de ratios"*y sus rangos que brinden información sobre los efectos que las actuaciones en mantenimiento tienen sobre determinadas varia - bles cuantitativas del sistema.

- Poca bibliografía ha sido encontrada sobre Informes de funcionamiento del mantenimiento. De acuerdo con la investigación realizada, no existen demasiados trabajos recientes sobre el tema.
- El problema de la recogida de los datos no ha sido tratada suficientemente en la literatura.
- Otros problemas detectados en el área de los informes de desempeño (performance) son la precisión de los datos y la oportunidad de los informes.
- Los problemas y los factores asociados con la implementación de un PMS (Sistema de Medida del desempeño/Performance) usando la técnica QFD son importantes, por lo que requeriría de más estudio .Los trabajos actuales han estado dirigidos solamente a la fase de diseño del sistema PMS soportado por QFD.
- No existe nada sobre la integración PMS con MMIS.
- No existe en la literatura indicadores que permitan evaluar, de forma apropiada, la gestión del mantenimiento. Por tanto, es necesario una línea de investigación orientada a resolver esta laguna con objeto de poder emitir informes apropiados.
- Por su enfoque global y estratégico, la aplicación del BSC (Balance ScoreCard) para la gestión del desempeño (performance) del mantenimiento es considerada un área potencial de investigación.

(A5) Sistemas de información del mantenimiento.

- Existe la necesidad de desarrollar una metodología que permita definir, diseñar y evacuar informes de funcionamiento que apoyen la toma de decisiones sobre base científica.
- Selección de Métodos científicos/analíticos adaptados a las necesidades de información del funcionamiento que permitan transformar los datos de entrada en información relevante, fiable y actualizada, para el apoyo en la toma de decisiones en la búsqueda de soluciones efectivas y eficientes (Módulo a agregar a los sistemas MMIS y CMMS).
- Se requiere un paso adicional que discrimine entre señales importantes e informa – ción de rutina.
- Las tendencias futuras estarán centradas en una cada vez <u>mayor exigencia de información actualizada que ayude a la toma de decisiones para minimizar los costes integrales del mantenimiento</u>. Los ejes básicos de actuación estarán centrados en:

• *<u>El desarrollo de sistemas integrados de información que permitan un seguimiento completo a nivel técnico – económico</u>.* A nivel de programas de mantenimiento, valorando la eficacia y eficiencia de los criterios técnicos empleados en función de los resultados obtenidos en base a parámetro de calidad, costes, fiabilidad, entre otros; a nivel de recursos humanos, valorando su productividad, optimizando su recorrido, operación, etc.; a nivel de gestión de almacén, valorando las rupturas de stocks, los niveles de rotación, etc.

• *El <u>desarrollo de elementos remotos que permitan obtener parámetros críticos de estado para el diagnóstico y pronóstico</u>, de forma fiable, del estado de un equipo/instalación.* Los objetivos son introducir mejoras en los trabajos de inspección, los programas de preventivo – predictivo y en las valoraciones de los resultados. Por ejemplo, la conexión de un SCADA (paquete de control para la mejora de la producción) con PLC´s u otros controladores para la captación de datos de interés para la gestión del mantenimiento (horas de trabajo de una máquina, tiempos de paro, niveles de lubricación, alarmas por avería, etc.) y un GMAO

permitirá eliminar los tiempos dedicados a ciertas rutas de inspección al mismo tiempo que se aumenta la fiabilidad y calidad de los datos recogidos.

- *El desarrollo de programas que permitan valorar diferentes alternativas de mantenimiento atendiendo a diferentes criterios (multicriterio):* programa a aplicar (convencional,...), beneficios esperados (tanto desde el punto de vista de la calidad, como de la mejora del nivel de pérdidas, aumento de la vida útil, de la capacidad y fiabilidad de las instalaciones, etc.). El objetivo de estos programas será valorar el retorno de la inversión para cada alternativa y permitir su priorización dentro de distintas zonas de la empresa.
- *Un campo potencial de futuro es la aplicación y desarrollo de un DSS para la gestión del mantenimiento orientado al objeto.*
- La toma de decisiones comporta asumir un coste. Disponer de la máxima infor - mación posible de forma clara, fiable y precisa y tener la posibilidad de disponer de una buena herramienta que permita simular escenarios de actuación técnico - económicos contribuiría a reducir las equivocaciones, y por tanto, los costes en la toma de decisiones.
- Otro elemento importante para una gestión eficaz son los ***procedimientos*** para las actividades de mantenimiento.

- Definición y desarrollo de sistemas IDSS (Intelligent Decision Support System) y IPDSS (Intelligent and Predictive Decision Support System). El diseño de estos sistemas se revela como un área atractiva de futuras investigaciones en plantas automatizadas y con equipos complejos (iniciadas por la City University of Hong Kong). Estos sistemas ayudarían a mejorar los procesos de planificación y programación del mantenimiento, reduciendo los efectos del backlog y gestión de stocks, en la fase de operación.

(A6) Políticas de mantenimiento.

- Es necesario la realización de estudios en la implementación integrada de varios enfoques: TQM + JIT + TPM, otros.
- Desarrollo del concepto de gestión neural del mantenimiento para un tratamiento más objetivo del procesamiento de los datos y la mejora de la calidad del proceso de toma de decisiones.
- Desarrollo del concepto de mantenimiento individualizado (customizado): diseño e incorporación de nuevos módulos (selección de materiales, gestión de datos, políti - cas de mantenimiento, estandarización, otros).
- El desarrollo modular permitiría la selección de los módulos a incorporar al módulo de soporte a la decisión prevista.
- Incorporación del juicio experto del ingeniero de mantenimiento en el diseño.
- Resolución de los problemas relacionados con la implementación de un modelo de gestión del mantenimiento orientado al objeto y su integración en un ERP.

CAPÍTULO II

MARCO DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN DE LA O&M DE SISTEMAS TÉCNICOS.

CAPÍTULO II: MARCO DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN DE LA O&M DE SISTEMAS TÉCNICOS.

El alto nivel de competitividad impuesto por las dinámicas y complejidad de los mercados actuales exige una elevada capacidad de respuesta (homeostasis). En este contexto, la toma de decisiones en la fase de adquisición es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos.

Sin embargo, las compañías afrontan severas dificultades a la hora de diseñar, rediseñar o reestructurar sus plantas productivas.

El analista, tanto en la Fase Inicial (Nivel 1) como en la posterior (Nivel 2), ha de tratar con un problema MCDM complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones y con objetivos normalmente en conflicto.

Es necesario, en la fase de diseño, rigor y una orientación hacia la gestión del ciclo de vida del sistema en base al interés y los objetivos del cliente. Por tanto, resulta fundamental que el analista disponga de una metodología que le permita investigar e innovar sobre diferentes alternativas de diseño para seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre los requerimientos asociados a la "componente de valor" y la "componente de coste total", sobre el ciclo de vida fijado.

En este capítulo se plantea un nuevo modelo para alcanzar los máximos niveles de eficiencia y efectividad de los activos y se analiza el papel de la O&M en la rentabilidad económica de un sistema, lo que sugiere la conveniencia de considerar, en el proceso de evaluación STM (i), un modelo de apoyo a la toma de decisiones que permita la integración de múltiples criterios.

1. MODELO DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LA ESTRATEGIA Y EL PROGRAMA DE GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO. NUEVO MODELO GENERAL DE MANTENIMIENTO PARA EL ASEGURAMIENTO DEL ESTADO.

El mundo del mantenimiento carece de un modelo general apropiado que permita a los profesionales del mantenimiento, y a la Alta dirección, comprender y gestionar los procesos internos asociados a la función mantenimiento en sintonía con los objetivos del negocio. (Coetzee, J.L., 1997a)

El análisis del modelo desarrollado por la Eindhoven University of Technology (E.U.T.) revela como necesario, para la integración del mantenimiento dentro de la estructura del negocio, el diseño de un modelo mejorado que recoja los procesos internos del bloque denominado *"Gestión del Mantenimiento"* (figura 39).

En el presente apartado se plantea un modelo de referencia para el diseño de la estrategia y el programa de gestión del mantenimiento para alcanzar los máximos niveles de eficiencia y efectividad de los activos.

Para el diseño del Programa de Gestión del Mantenimiento, las claves serían:

(a) Enfoque holístico. Ser visto como un concepto amplio dentro del total de las actividades que se ejecutan, teniendo en cuenta todas sus interacciones.

(b) Proactivo.

(c) Centrado en los objetivos del negocio. Incluyen los objetivos de producción, entorno y seguridad.

(d) Asegurar el funcionamiento efectivo de los activos críticos.

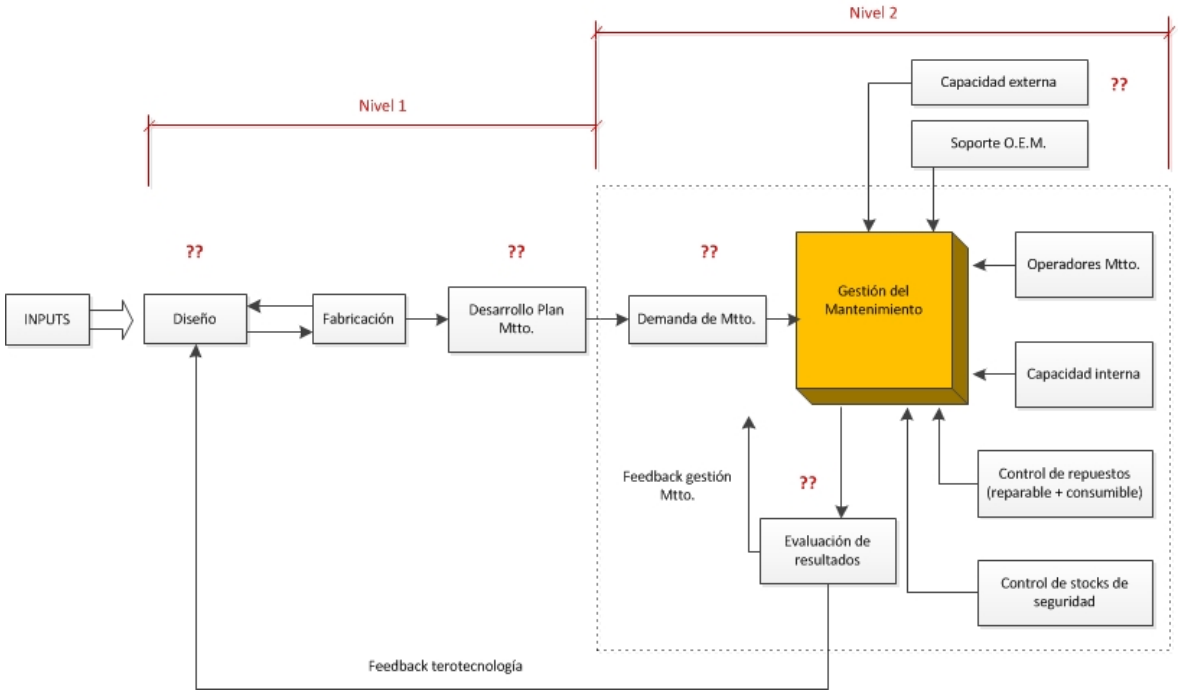


Figura 39: Hacia un nuevo modelo general del mantenimiento.

En el nuevo modelo general de mantenimiento para el diseño de la estrategia y el programa de gestión, atendiendo a los ejes de actuación de la función mantenimiento para la mejora de la competitividad, deberían considerarse dos niveles:

- ***Nivel 1: Fase de inversión.***

Una parte significativa de los costes de mantenimiento en la etapa de operación pueden ser pronosticados en las fases de diseño y proyecto, siendo, en estas etapas previas, más fáciles de corregir/evitar que cuando los activos están en producción. Resulta interesante, que en esta etapa, no sólo se consideren los requerimientos funcionales, sino que también se adapte y desarrolle el diseño para aumentar la disponibilidad, la fiabilidad y reducir los costes de mantenimiento en la fase de operación. Este mantenimiento debería considerarse en la primera fase del proceso. Existen modelos y bases de datos de costes estimados desarrollados para controlar, calcular y predecir los futuros costes de operación y mantenimiento.

El objetivo es que las nuevas instalaciones, y las reformas de las actuales, cuenten con el asesoramiento y la experiencia de Mantenimiento con vistas a conseguir:

- Equipos con tecnología conocida.
- Equipos fiables y de fácil mantenimiento.
- Unificación de repuestos con objeto de reducir su número y variabilidad.
- Un recepcionado y montaje ejecutado de acuerdo con las mejores reglas.
- Disponer de la documentación técnica adecuada, etc.

En las industrias intensivas en capital, resulta especialmente importante mejorar el LCC de los activos (figura 40) dado que la curva de ingresos es extraordinaria - mente sensible a perturbaciones en los procesos de producción, no solamente por la influencia negativa sobre la capacidad de utilización, sino también por su influencia

sobre factores relacionados con la competitividad (calidad, tiempos de entrega, etc.), que permiten al cliente soportar un sistema JIT y mejorar la eficiencia de su capital.

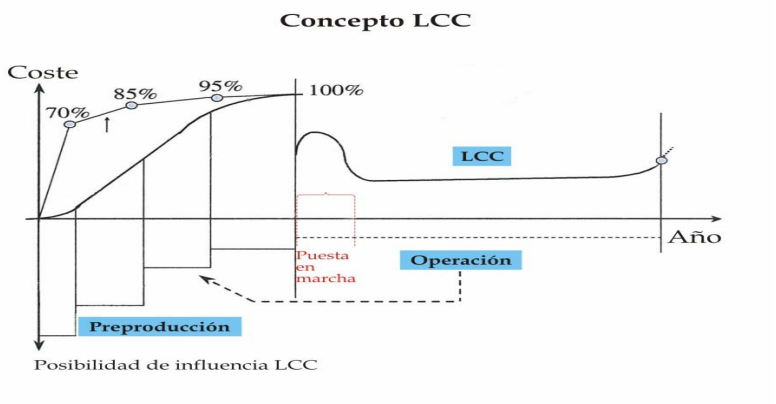


Figura 40: Concepto del LCC (Hans Ahlmann, 2002).

Un primer beneficio de este nivel es que favorece la flexibilidad del precio, permitiendo a las compañías ser más sensibles al aumento de la competitividad.

Bajo esta filosofía, los responsables de mantenimiento tendrán una activa partici - pación desde la petición de ofertas, adjudicación, supervisiones, control de documen tación, políticas de unificación, compra de repuestos y en recepción de equipos y montajes.

Todo nuevo proyecto o reforma debería ir acompañado de un estudio de LCC (análisis del coste del ciclo de vida), benchmark, análisis de riesgos, impacto medio-ambiental y estudio de sostenibilidad; con expresa mención de los requisitos esta - blecidos por Mantenimiento. El desequilibrio existente entre los Costes de Adqui - sición y Sostenimiento demuestra la conveniencia de:

- Utilizar como criterio de adquisición de activos la información del LCC, más que el bajo coste inicial de compra.
- Implicar/comprometer al personal que gestiona el mantenimiento en las etapas iniciales de concepción y diseño del sistema y sus procesos.

El análisis brindado por el estudio LCC dará la posibilidad de preparar especificaciones optimizadas para los nuevos equipos y sistemas.

El objetivo en este nivel (figura 41) será brindar soluciones óptimas globales y gobernables en origen (fases de concepción y diseño).

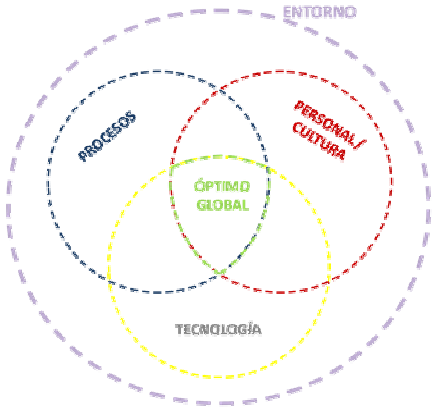


Figura 41: Enfoque para la búsqueda del Óptimo global.

- ***Resultados esperados en el nivel 1.***

La identificación "temprana" de la estructura total de costes asociada al proyecto en estudio, el análisis de sus elementos, y la modelización de las funciones relevantes permitirá realizar, a priori, un ""estudio de equilibrado" del rendimiento, la fiabilidad, la mantenibilidad y los requerimientos de mantenimiento. Por tanto, los resultados del estudio, en este nivel, darán la oportunidad de:

- Alinear los objetivos a nivel estratégico, táctico y operativo.
- Implicar a operación y mantenimiento en los procesos de adquisición. Ello brin - dará la posibilidad de disponer de datos cuantitativos relevantes para soportar, de forma científica, la toma de decisiones en los procesos de búsqueda de óptimos globales.
- Disponer de una "hoja de ruta" o "mapa de proceso" que permita extraer, en ba - se al consenso de los agentes responsables de su cumplimiento, los ratios y los clusters de ratios para la gestión. El análisis detallado de los elementos de costes del "Árbol de Costes de Sostenibilidad" permitirá a los ingenieros y gerente de mantenimiento identificar los inductores de costes críticos (o los inductores de ingresos críticos) cuyo control resulta esencial para alcanzar los resultados estable - cidos.
- Fijar las tolerancias, y por tanto, los niveles de desviación admisibles para la con- secución de los resultados (establecimientos de umbrales de desviación).
- Fijar los niveles de" alerta temprana (setpoint)" y definir los planes de actuación para corregir las desviaciones detectadas.
- Generar una base de datos relevantes que oriente la toma de decisiones a futuro.
- Crear una disciplina de información y monitorización que permita el control di – námico del sistema, la realización , de forma objetiva, de los presupuestos, la gestión del ciclo de vida de activos, etc.

La función mantenimiento tiene una importante influencia en la gestión de riesgos, y por tanto, en los beneficios empresariales. Sus efectos se traducen en una mejora de la disponibilidad, fiabilidad y operatividad de los equipos, de la seguridad, en la reducción del nivel de pérdidas en producción, en la reducción de los efectos medioambientales, pérdida de calidad y costes de mantenimiento.

Como base para los procesos de reducción del riesgo es necesario tomar decisiones de diseño (Nivel 1: a priori) y gestión (Nivel 2: a posteriori).

La figura 42 muestra varias de las principales áreas del ciclo de mantenimiento y la dependencia de una sobre otras:

Figura 42: Orden de implementación.

El área de ejecución de trabajos (base de la pirámide) es considerada por muchos el corazón del mantenimiento. Sin embargo, su eficiencia y efectividad vendrá condicionada por las capas superiores. Una de las más importantes (la fundacional) es la cúspide de la pirámide, donde se define la política que dicta los procedimientos a los cuales ha de subordinarse la planificación del mantenimiento. Por tanto, la solución no pasa por la implantación de soluciones locales altamente sofisticadas, sino por un enfoque holístico e iterado que brinde una organización de la función acompasada con los objetivos del negocio. Se trataría de aplicar una variedad de técnicas, debidamente seleccionadas, a pequeñas partes (pero con visión global) para tratar riesgos innecesarios e ir ascendiendo, de forma progresiva y manejable, en vez de una única técnica a toda la organización.

- ***Nivel 2: Fase de operación.***

Para obtener el máximo retorno de la inversión y mantener los máximos niveles de productividad, es necesario disponer de un proceso que, de forma efectiva, traduzca la información de los activos en conocimiento relevante y oportuno para apoyar la toma de decisiones. Por tanto, el Programa de Gestión del Mantenimiento debería realizarse en base a los siguientes elementos claves:

(a) ***Estrategia*** *de mantenimiento.* Supone la evaluación de las actividades vinculadas a los trabajos de mantenimiento en relación con las instalaciones vs. objetivos del negocio. Ha de buscar el alineamiento de las actividades con los objetivos del negocio. El alineamiento puede ser iniciado por la incorporación de nuevos equipos o por equipos ya existentes ("calibración" del sistema ante estímulos internos y/o externos). En esta etapa se generaría las*"guías de requerimiento de servicios"* para el programa de mantenimiento: tareas de preventivo sistemático (limpieza, lubricación, calibración, inspección); tareas de predictivo (vibración, termografía, etc.); tareas basadas en la condición (diferencial de presión para limpieza/ cambio de filtros, otras).

Es necesario seleccionar herramientas que permitan definir, de forma consistente, el mix apropiado de actividades en base a la identificación de los fallos potenciales de los equipos/instalaciones críticos para alcanzar los objetivos, a nivel de producción, calidad, medioambiente y seguridad del personal. Dentro del kit de potenciales herramientas se consideran el RBM (Risk-Based Maintenance), SRCM (Streamlined Reliability-Centered Maintenance) y el RCM (Reliability-Centered Mainte - nance). Se trataría de un *"programa vivo"* que se actualizará en base a un conjunto de variables (Órdenes de trabajo de correctivo y preventivo, cambios de diseño, ciclos de mercado, cambios a nivel operativo, cambios en los objetivos del negocio, análisis RCFA, etc.)

A este nivel se definen los "Indicadores Claves del Desempeño (KPI´s)" que permiten gobernar el alineamiento táctico con la estrategia y los objetivos del negocio. En base a ellos, se realizarán los ajustes de la estrategia ante cambios en los objetivos.

(b) ***Identificación*** *de los trabajos.* La clave del éxito de esta etapa radicará en la definición de un CMMS (Sistema Computerizado de Gestión del Mantenimiento) que integre, de forma comprensible, efectiva y eficiente, el flujo de datos con el proceso de toma de decisiones para la gestión de las órdenes de trabajo. Es esencial para el éxito, el alineamiento de la cultura, la tecnología y los procesos.

La organización debe estar capacitada para recoger e interpretar aquellos datos que son necesarios para el desarrollo de la estrategia y convertirlos en información útil para la decisión.

Esta etapa representa el corazón del proceso de análisis de costes.

Para alimentar al CMMS se contempla la instrumentación de campo (analizado - res de vibración on-line, PLCs), datos históricos, observaciones del operador, etc.; es necesario una eficiente organización y presentación de los datos para soportar un proceso de toma de decisiones integrado. Igualmente importante para apoyar la toma de decisiones, es la identificación de las *"reglas definidas por el usuario (odontología)"*para la interpretación de los datos y su correlación con otros.

(c) ***Control*** *de los trabajos ("guías de planificación").* Implica el diseño de procedimientos para la planificación y programación de los trabajos identificados por el CMMS. La organización debería ser realizada sobre un enfoque multivariable /multiparámetro (tiempo, condición, horas/hombre, etc.).

(d) ***Ejecución*** *de los trabajos.* Identificado, planificado y programados los trabajos, será fundamental, una vez realizados, el diseño de un procedimiento para una efectiva retroalimentación de campo; esta juega un papel clave en la medida de los resultados y los procesos de mejora continua. Es necesario conjugar, de forma efectiva, el sistema de O.T.´s con un apropiado PMT (Testing Post-Maintenance).

Estos cuatro elementos son necesarios conjuntamente (figura 43):

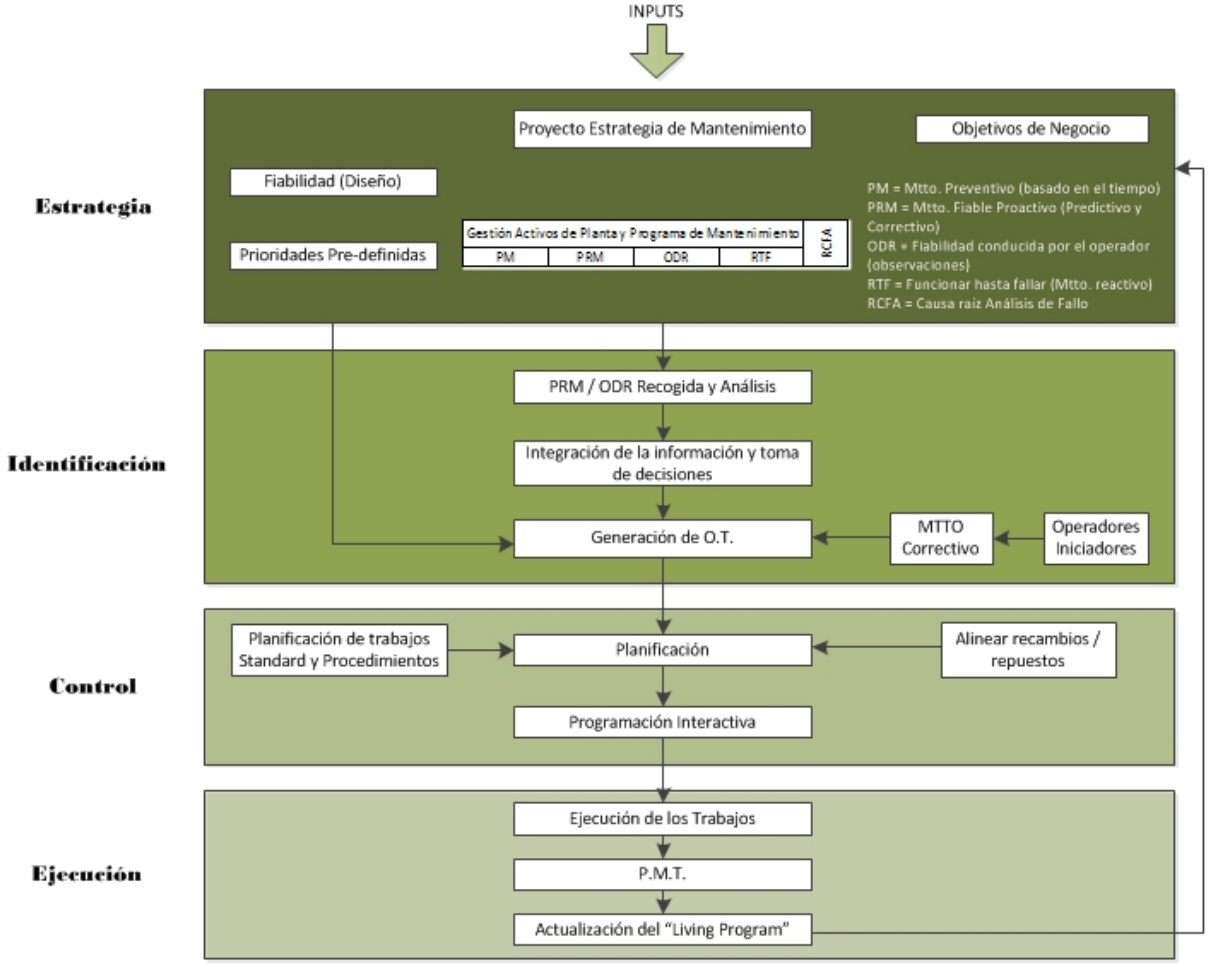


Figura 43: Nivel 2: Conceptos básicos y sus elementos (Toomey G., 2004).

La ausencia de alguno de ellos reduciría notablemente la calidad de los resul - tados.

Las claves para la selección de la solución óptima son:

1.- Clara definición y comprensión de los objetivos del negocio.

2.- Identificación de los desequilibrios (gaps).

3.- Identificar los retos y oportunidades.

4.- Definir un modelo que brinde soluciones que permanezcan alineadas con los resultados de los puntos anteriores.

La figura 44 define, en cada nivel, la visión con la que habría que enfocar la fase de diseño, la responsabilidad y la influencia de las áreas de Ingeniería y Planificación de la O&M:

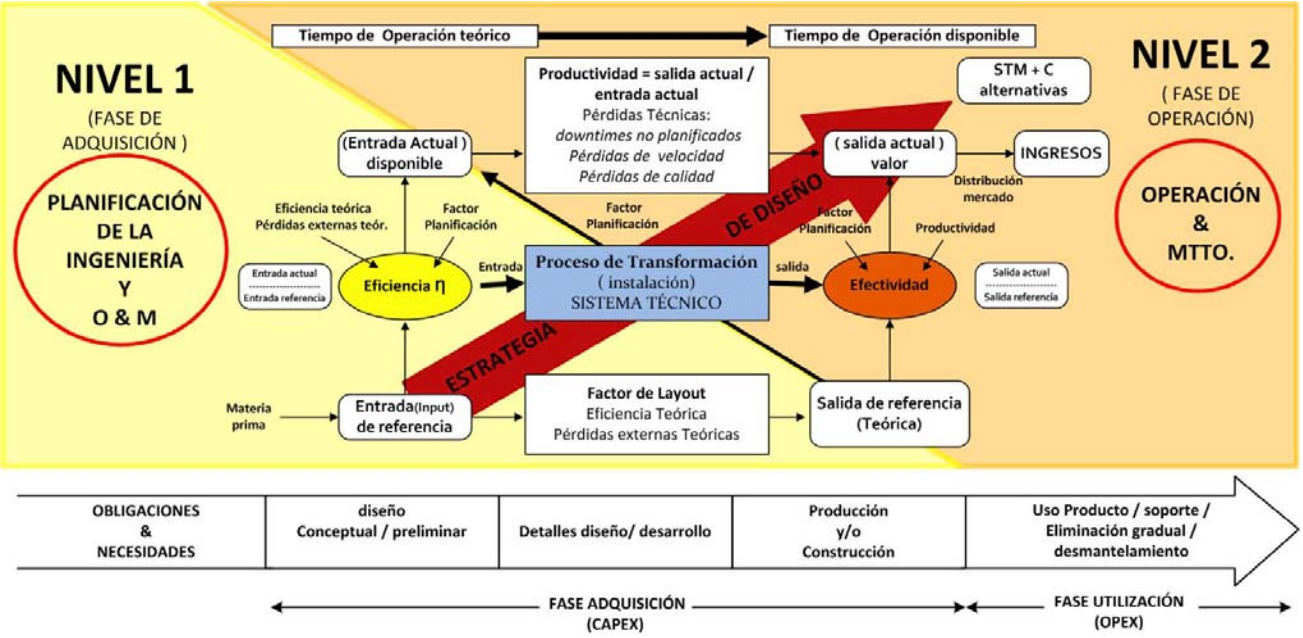


Figura 44: Diseño orientado hacia el Ciclo de Vida.

2. MARCO DE REFERENCIA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO Y LA PLANIFICACIÓN DE LA O&M.

Varios estudios japoneses (relacionadas con el TPM) muestran que las pérdidas vinculadas a la eficiencia son mayores que las pérdidas vinculadas al downtime. En consecuencia, es importante considerar que la productividad no sólo puede ser influenciada actuando sobre la efectividad, sino también sobre la eficiencia (fase de diseño).

Por tanto, el programa para el aumento del nivel de los factores de RAMS y de la rentabilidad económica de un sistema técnico debería estar centrado sobre la mejora de su Eficiencia como de su Efectividad. Debería ser un" programa vivo".

Tam y Price (2008) consideran que existen tres dimensiones críticas en el proceso de toma de decisiones para optimizar la planificación del mantenimiento: dimensión salida (output), dimensión riesgo y dimensión recursos.

La figura 45 indica el marco de referencia propuesto por dichos autores para la optimización del diseño y la planificación de la O&M de soluciones STM + C:

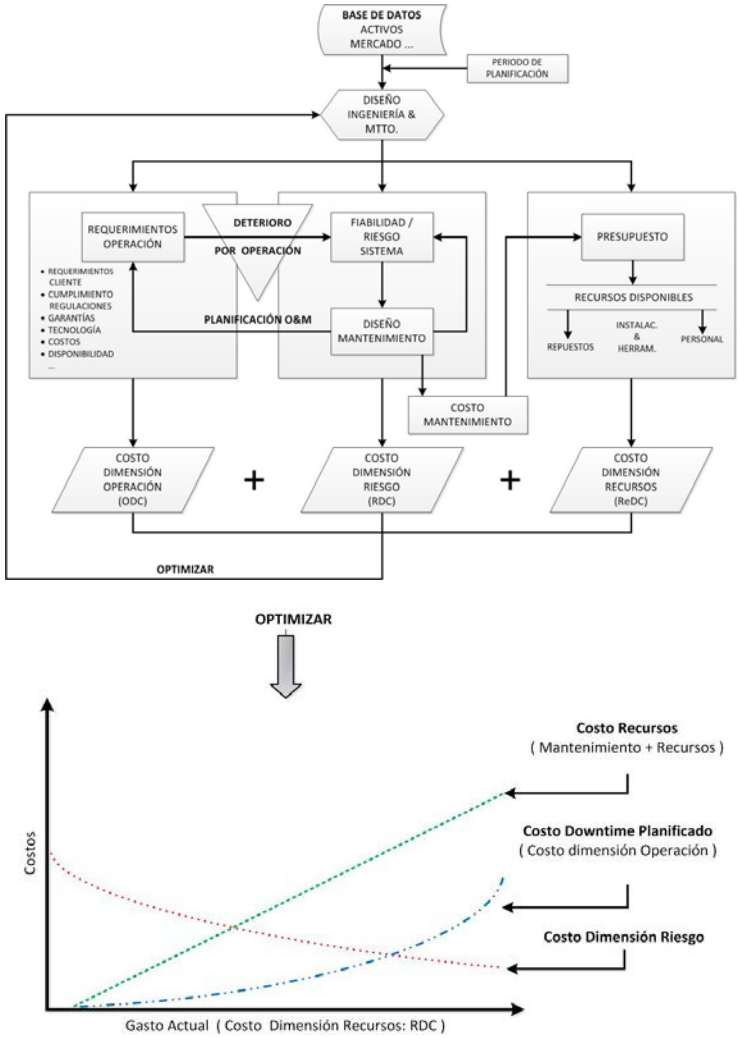


Figura 45: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M (Tam y Price, 2008).

2.1. Dimensión salida (Output): Eficiencia, efectividad y productividad.

Los costes de Operación y Mantenimiento (O&M) son elementos claves para la viabilidad económica de un sistema técnico. Tanto la instalación ("hard"), como los procesos de operación y mantenimiento ("soft") vinculados a la STM adoptada, han de estar sujetos a un proceso de optimización con objeto de minimizar las "pérdidas" y maximizar el ROI.

Para garantizar el máximo beneficio en la fase de operación, resultan interesantes los procesos de optimización en la fase de diseño para mejorar la eficiencia del sistema y alcanzar la máxima efectividad, "productividad real neta" y el máximo ROFA en la fase de operación.

Un sistema técnico, en base a la definición general input/output utilizada para la descripción de los procesos de fabricación (Wauters J, Mathot J.), está formado por una instalación en la que se realiza el proceso de conversión de inputs en outputs. Lo que entra en un sistema en una forma y sale de él de otra es usualmente llamado "throughput".

Dada la diversidad de interpretaciones de muchos términos en operación y mantenimiento, se considera importante comenzar dando una definición de los principales términos que más inciden en el proyecto y explotación de un sistema, y

que, por tanto, han de ser tenidos en consideración en su fase de diseño (Wauters J, Mathot J.):

- Instalación: Conjunto de activos seleccionados para realizar el proceso de Transformación / producción.
- Unidad de producción: Activo físico que realiza una función relevante en el proceso de producción: torno, alto horno, WEC, etc.
- Componente: Parte de la unidad de producción que no puede ser dividida sin perder su identidad.
- Productividad. Cociente entre la salida (output) y la entrada (input) actuales:

$$\text{Productividad} = \frac{salida(output)\ actual}{entrada(input)\ actual} \quad \textbf{(1)}$$

- Eficiencia. Cociente entre la entrada actual y la entrada de referencia:

$$Eficiencia = \frac{entrada(input)\,actual}{entrada(input)\,de\,referencia} \quad \textbf{(2)}$$

- Eficiencia total (η). Se define como un factor que incluye las pérdidas contempladas en la fase de diseño (fases de ingeniería y planificación de O&M):

$$Eficiencia\ Total\ (\eta) = LF * PF \quad \textbf{(3)}$$

$-LF(Factor\ de\ Layout)$: *representa las pérdidas de eficiencia de los subsistemas y sus componentes vinculadas al emplazamiento y la distribución en planta.*

$-PF(Factor\ de\ Planificación)$: *recoge y contabiliza las "pérdidas externas" (downtime planificado)*

- Downtime: Es la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo represen tativo (normalmente el tiempo de producción teórico), para los cuales una unidad de producción no está operativa debido a tareas de mantenimiento. Se puede distinguir entre el downtime planificado y el no planificado.
- Efectividad. Cociente entre el output actual y el output de referencia:

$$Efetividad = \frac{salida(output)\,actual}{salida(output)\,de\,referencia} \quad \textbf{(4)}$$

- Factor de Planificación (Planning Factor: PF). Se utiliza para medir la utili - zación de la instalación en el tiempo de producción teórico. Se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$P.F. = \frac{Tiempo\ de\ producción\ disponible}{Tiempo\ de\ producción\ Teórico} = \frac{Tiempo\ de\ producción\ Teórico - Pérdidas\ externas}{Tiempo\ de\ producción\ Teórico} = \quad \textbf{(5)}$$

$$P.F. = 1 - \frac{Pérdidas\ externas}{Tiempo\ de\ producción\ Teórico}$$

De la expresión anterior se observa que el P.F. puede ser alterado por un suceso no planificado, como por ejemplo, un fallo de suministro de materia prima, una huelga, un cambio de regulación.

- Tiempo de producción disponible (uptime). Es el tiempo en el cual la producción puede ser planificada. Vendría representado por la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo representativo (normalmente el tiempo de producción teórico) para los cuales una unidad de producción está operativa.
- Factor de utilización. Para una unidad de producción, representa el % de utilización del uptime.
- Disponibilidad (Availability). Propiedad que cuantifica la parte de uptime de una unidad de producción. Se define con mayor detalle en el apartado 2.3.
- Tiempo de producción teórico. Es una constante de tiempo; viene representada por el tiempo máximo (horas/día) disponible para el ciclo de vida planificado. Vendría expresada por la suma del uptime y el downtime total.
- Especificaciones de funcionamiento (Fuctional performance, FP). En algunos casos, el cambio en el estado físico de una unidad de producción puede conducir a una disminución gradual de su rendimiento (disminución en la calidad del producto, del número de unidades producidas, del nivel de disponibilidad, etc.). Definimos las Especificaciones de funcionamiento (functional performance) como el conjunto de índices (índices de performance) utilizados para caracterizar el funcionamiento de un sistema/subsitema/componente, de acuerdo con los requerimientos del cliente. Los valores establecidos para los mismos nos permiten valorar el nivel del rendimiento.

Una parte significativa de los costes de mantenimiento, en la etapa de operación, pueden ser pronosticados en las fases de diseño y proyecto, siendo en estas etapas previas más fáciles de corregir/evitar que cuando los activos están en producción. Resulta interesante que en esta etapa no sólo se consideren los requerimientos funcionales, sino que también, se adapte y desarrolle el diseño para aumentar la disponibilidad, la fiabilidad y reducir los costes de mantenimiento en la fase de operación.

Por tanto, un término crítico del análisis sería la determinación de la "Eficiencia del Proyecto (EP)" para la solución propuesta. Es un Factor Corrector que se introduce para compensar diferentes efectos, normalmente de carácter técnico (pérdidas eléctricas, de caudal, etc.), que minoran, en general, los resultados teóricos previstos en proyecto (producción de referencia, tiempo de producción disponible, otros). Sería utilizado como factor en las fórmulas para el cálculo de compensaciociones (penalizaciones y bonificaciones). Suele venir representado por el factor de emplazamiento o distribución en planta (Layout Factor, L.F).

La figura 46 muestra el marco de referencia para el el diseño de los modelos de decisión en los niveles 1 y 2, respectivamente, en función de la visión con la que habría que enfocar la fase de diseño, la responsabilidad en cada nivel y la influencia de las áreas de Ingeniería y Planificación de la O&M:

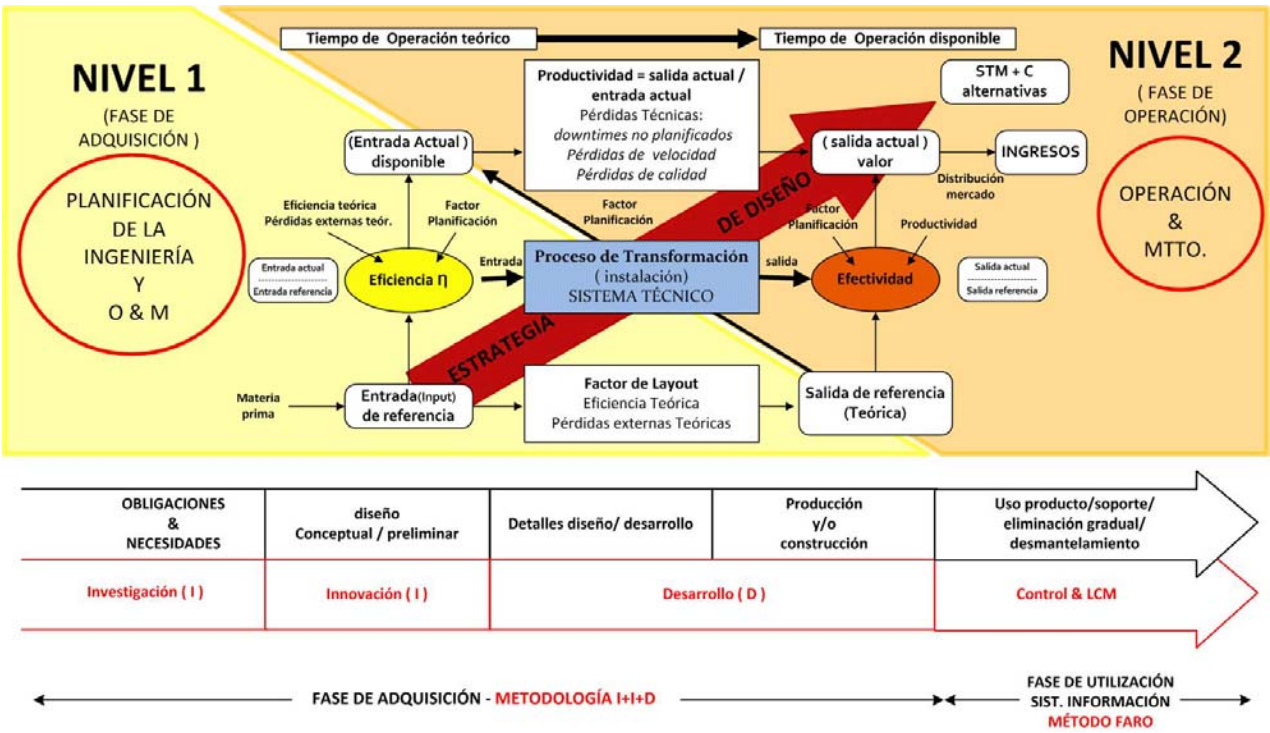


Figura 46: Marco de referencia para el diseño de los procesos de decisión en los niveles 1 y 2.
Diseño focalizado hacia el Ciclo de Vida.

En la fase Conceptual (preliminar) de cualquier proceso o sistema de nueva in - versión es donde es más fácil incorporar, o implementar, un cambio o una mejora (figura 47):

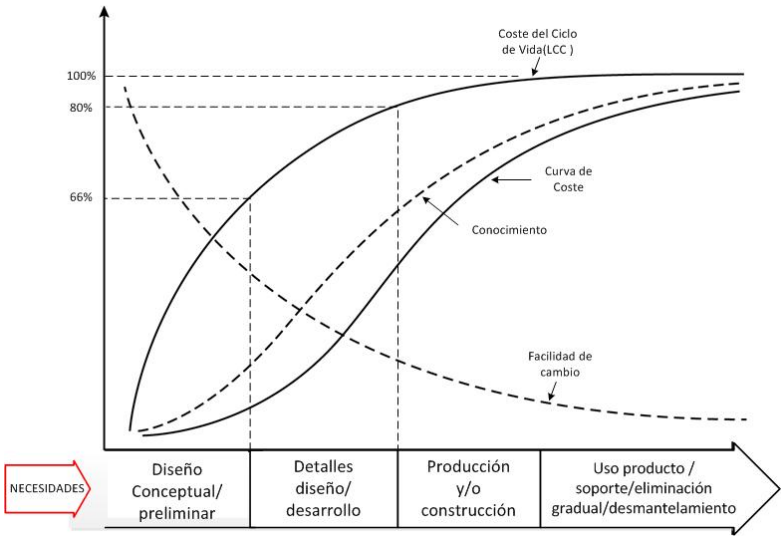


Figura 47: Evolución del conocimiento y la facilidad de cambio (Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991).

Durante las fases de Detalle del diseño y Producción y/o construcción, las influencias de las mejoras tienen mayores resultados, pero la facilidad para incorporarlas o aprobarlas son mínimas. Una vez el sistema es construido y se encuentra en la fase de Utilización, las posibilidades de mejorar su eficiencia son prácticamente nulas. De igual modo, en esta fase, es difícil justificar una nueva reforma, una modificación o una gran parada asociada.

Otro problema es la incertidumbre implícita al proceso de toma decisiones, en la fase de adquisición, relacionada con la información acerca de los costes de funcionamiento, el rendimiento potencial del sistema y su esperanza de vida (Wübbenhorst, K. L. ,1986). Por tanto, es necesario un enfoque probabilística (o basado en el riesgo) donde se valoren diferentes escenarios asociados con cambios probables de las condiciones de contexto. Igualmente importante, es la monitorizción para validar las decisiones de diseño o activar los planes de contingencia diseñados al efecto.

En base a estas restricciones, y a partir de la definición del P.F. en la ingeniería y la fase de planificación de la O&M, se estimaría la producción disponible. La definición rigurosa y realista de este factor es importante para la valoración de la rentabilidad de la inversión. La atención debe centrarse en la definición de la estrategia de O&M que minimice el downtime y maximice la "disponibilidad contractual", por su influencia directa y positiva sobre los ingresos y el beneficio.

Por tanto, la E.P., el P.F., y la estrategia de O&M, han de ser definidos en la fase de diseño (Nivel 1); ello permitirá identificar la mejor solución STM que haga económicamente rentable la inversión y garantice un nivel de competitividad sostenible en la fase de operación.

Las paradas planificadas (recogidas en el P.F.) están en la frontera entre la ingeniería y la fase de planificación de la O&M. Ello da la posibilidad de reducir las pérdidas asociadas a las mismas a través de una acertada definición de la O&M.

La productividad del sistema ($p < 1$) se ve afectada por las pérdidas vinculadas a los problemas técnicos que puedan aparecer, en la fase de utilización, en los procesos de operación y mantenimiento. Por tanto, la "productividad real neta" dependerá de la eficiencia de la instalación (η**:** Fase de diseño) y la efectividad de los procesos de O&M (Fase de operación).

Para el proceso de selección sería interesante un método que permita la definición estructurada de alternativas e incluya un informe detallado de los parámetros críticos de operación, mantenimiento y coste total que favorezca la investigación e innovación en el proceso de decisión.

2.2. Dimensión riesgo: Pérdidas externas y pérdidas técnicas.

De acuerdo con Wauters J, Mathot J.**,** las pérdidas pueden ser divididas, por un lado, en función al tipo: downtime, velocidad, calidad; y, por otro lado, en función a la causa: malfuncionamiento de la máquina, de proceso, externas.

La figura 48 muestra el efecto de las pérdidas sobre el tiempo de producción teó - rico y el tiempo de producción disponible:

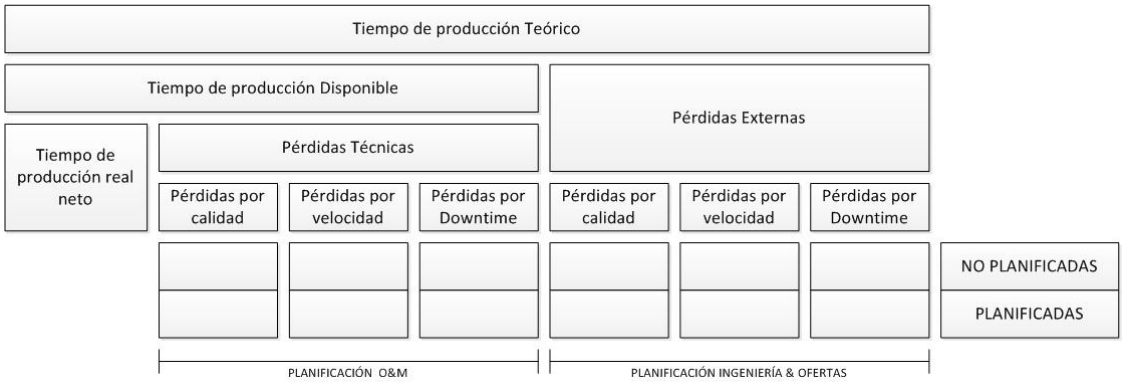


Figura 48: Matriz de evaluación de las pérdidas de un sistema y su efecto sobre los tiempos de producción.

- Pérdidas externas.

De la figura 48 se extraen las siguientes relaciones de interés:

Tiempo de producción Disponible = Tiempo de producción Teórico – Pérdidas externas **(6)**

El *Tiempo de producción Disponible* es responsabilidad de producción y mantenimiento. Se verá afectado por las pérdidas causadas por los procesos o malfuncionamiento de las máquinas; esto es, por las denominadas "pérdidas técnicas".

Tiempo de producción real neto = Tiempo de producción Disponible – Pérdidas técnicas **(7)**

La expresión (6) muestra que el *Tiempo de producción Teórico* se ve afectado por las denominadas *Pérdidas externas*. Estas pérdidas tienen gran importancia a nivel estratégico, y por tanto, para la Alta dirección. Han de ser examinadas con rigurosidad y nivel de detalle; las decisiones orientadas a su reducción influyen directa, y positivamente, en el nivel de ingresos y los beneficios.

La tabla 11 recoge la subdivisión de las pérdidas externas y la capacidad de influencia en la fase de planificación de O&M, según la Teoría general (Wauters, J., Mathot, J.):

Tabla 11: Subdivisión de las pérdidas externas sobre las bases de la Teoría general. Matriz de decisión.

Tipos de pérdidas	Causas	**¿Capacidad de actuación O&M?**	**Estrategia O&M (PF)**
(a) Paradas externas (downtime)	Paradas para P.M. (Mantenimiento programado)	**Sí**	Planificación actuación Estudio de optimización…
(b)Pérdidas de velocidad	(i) caída de la demanda de mercado	No	Diseñar Acuerdo contractual
	(ii) Falta de materia prima (calidad /cantidad)	No	Definir escenarios y estrategias
	(iii) Demasiado entrada (input) (Ej: viento, parques eólicos)	**Sí**	Planificación actuación
	(iv)Falta de personal (huelga, epidemia, desastres…)	No	Diseñar estrategia. Negociar Acuerdo contractual: Fuerza mayor, etc.
	(v) Modificación regulación (medioambiental,…)	No	Diseñar y Negociar Acuerdo contractual
(c)Pérdidas de calidad	Pérdida nivel de calidad concertada (ej: en la fase de ajuste)	No	Definir escenarios y estrategias

Es importante hacer notar que no todas las pérdidas externas son pérdidas por paradas (downtime losses).También pueden aparecer pérdidas de calidad debidas a causas externas inducidas; por ejemplo, por la elección de un mal proveedor; este tipo de causa puede generar, no sólo pérdidas económicas, sino también de imagen.

De la tabla 11 se observa que las pérdidas externas sólo pueden ser planificadas parcialmente (ej: mantenimiento programado); todas deberían ser trazadas en el PF. Es conveniente tener valorado y previsto planes de contingencia para aquellos factores poco frecuentes y poco o nada controlables. La tabla resulta de gran utilidad

como matriz de decisión semicuantitativa para orientar la estrategia de O&M y los aspectos claves en la negociación del contrato.

- Pérdidas Técnicas.

(a) Paradas no planificadas (Unplanned downtime): Disponibilidad (A).

La causa principal es el fallo (de misión o de demanda). El total de paradas no planificadas de un componente del sistema depende de factores que fundamental - mente están relacionados con la ingeniería y el proceso de planificación de O&M (política de mantenimiento, tipo de fallo, accesibilidad, experiencia y cualificación del equipo humano, tiempo de respuesta).

(b) Pérdidas técnicas de velocidad: Performance (P).

Una vía de reducir los efectos es una apropiada política de O&M (apropiado condition monitoring on-line; intervalos de inspección; otras).

2.3. Dimensión Recursos. Disponibilidad vs. gasto en mantenimiento.

La rentabilidad económica de un sistema técnico, en general, está basada en el principio de disponibilidad (figura 49).Consecuentemente, el riesgo económico au - menta con la pérdida de disponibilidad de sus instalaciones.

La figura ilustra los conceptos básicos, las restricciones, la influencia de las áre - as de Ingeniería y Planificación de la Operación (Nivel 1), y Operación y Mante - nimiento (Nivel 2), en la disponibilidad y la rentabilidad económica de un proyecto:

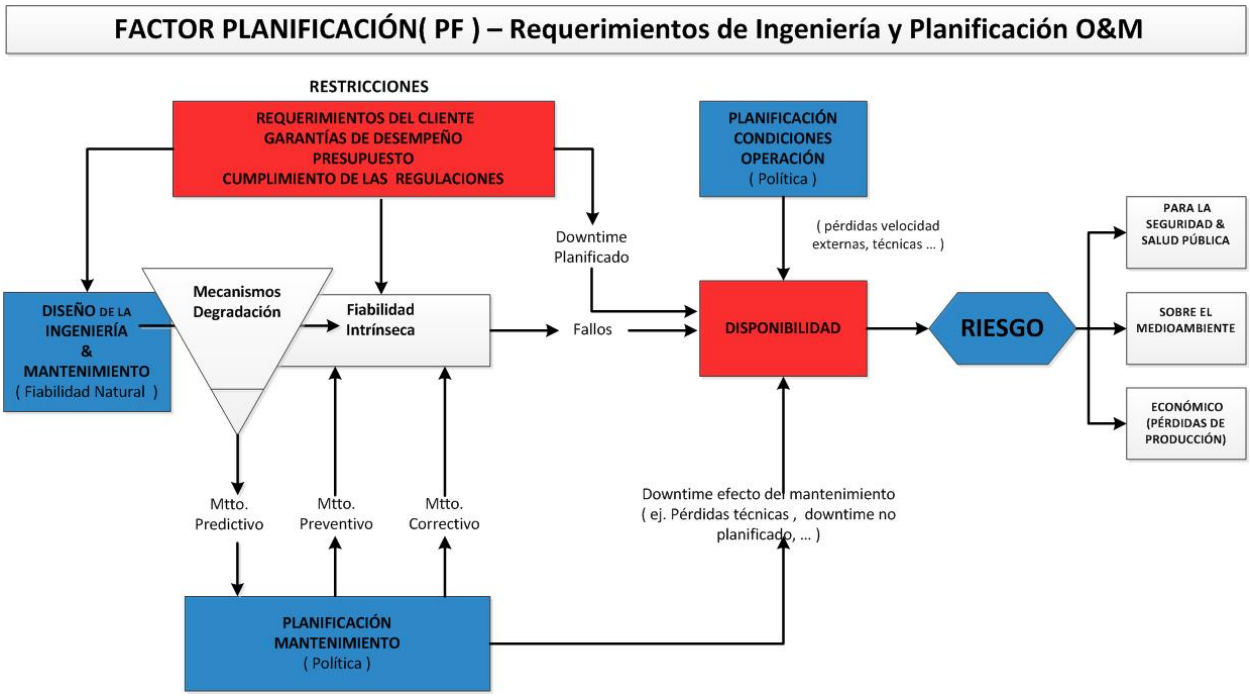


Figura 49: Influencia de las Especificaciones Técnicas y la planificación de la O&M (STM) sobre la disponibilidad y la rentabilidad económica de un sistema (Adaptado de Martorell, S. et al., 2004).

El downtime es un componente significativo de coste en las industrias, y de modo especial, en las de proceso continuo. Por tanto, la mejora de la rentabilidad económica debería centrarse en la definición de las especificaciones técnicas y la política de O&M (STM+C). Un objetivo, sería mantener un nivel óptimo de fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo. Sin embargo, la mantenibilidad y la disponibilidad suelen tener efectos opuestos. Alcanzar un determinado nivel de "disponibilidad técnica" exige unos costes, los cuales

normalmente serán mayores al aumentar dicho nivel (assesment of cost contribu - tions).

- **Fiabilidad (Reliability: R).**

La fiabilidad representa la capacidad para responder y continuar operando sin fallo, y bajo determinadas condiciones específicas, durante un periodo de tiempo dado o edad (Martorell, S., et al., 2004).De esta manera, el fallo se define como una interrupción de la capacidad funcional o disminución del rendimiento por debajo de un umbral establecido en las especificaciones funcionales. Las consecuencias del fallo pueden ser tanto financieras como no financieras (pérdida de tiempo de produ - cción, satisfacción del cliente, incumplimiento de garantías, penalizaciones legales, u otro tipo de responsabilidades).

El coeficiente de fallo de un sistema viene dado por el Tiempo Medio entre Fallo (MTBF, Mean Time Between Failure). En la práctica, la fiabilidad se determina a través de la siguiente fórmula general (Blanchard, B.S. y Fabrycky, W., 1990):

$$R = 1 - \frac{Número\ de\ fallos}{Tiempo\ total\ de\ operación} \quad \textbf{(8)}$$

La fiabilidad natural es la fiabilidad propia/inherente del equipo (sin recibir mantenimiento); depende directamente de las características físicas o de diseño. Por contra, la fiabilidad intrínseca es la agregada (en principio mayor que la natural) en base a la cantidad de mantenimiento de calidad realizado (usualmente preventivo). (Martorell, S., et al., 2004)

Una discusión más detallada del cálculo de la fiabilidad puede ser consultada en Schram, G.- GS03002.

- **Disponibilidad (Availability: A).**

La disponibilidad de un equipo, en general, viene representada por su capacidad de estar en estado para funcionar, sin fallo, bajo unas condiciones especificadas durante un periodo dado. La disponibilidad, o más directamente la indisponibilidad, depende no solamente del efecto downtime, sino también de la probabilidad de fallo para realizar su función (efecto de no fiabilidad). Para reducir este efecto, es necesario planificar y programar intervalos de inspección.

La disponibilidad está fuertemente relacionada con la fiabilidad y la mante - nibilidad. Un sistema fiable requiere menos mantenimiento y una buena mante - nibilidad tiempos de reparación más cortos.

La disponibilidad de un sistema se puede determinar a través de la siguiente fórmula general:

$$Availability = \frac{Uptime}{Uptime + downtime} \quad \textbf{(9)}$$

Existen otras formas diferentes de medir la disponibilidad, y por tanto, diferentes expresiones para su medida; dependiendo de lo que se incluya en el análisis del uptime y el downtime podemos distinguir, a nivel teórico: la disponibilidad inheren - te, la realizada y la operativa.

- **Mantenimiento (Maintenance: M).**

El mantenimiento representa, según Martorell, et al., el conjunto de actividades realizadas sobre el equipo con objeto de evaluar, conservar o restaurar su capacidad operativa. Aunque un equipo esté sometido a mantenimiento (correctivo y preven - tivo) este puede degradarse con el tiempo en función de las condiciones de trabajo y

la efectividad del mantenimiento planificado (mantenimiento imperfecto). Por tanto, es importante la programación de actividades de predictivo para el control de los mecanismos de degradación.

El mantenimiento introduce también un efecto negativo, llamado efecto downtime, el cual viene representado por el tiempo que el equipo está fuera de servicio por mantenimiento (correctivo, preventivo sistemático, overhaul, etc.). Este tiempo depende de las características de mantenibilidad del equipo, las cuales son función, no sólo de sus características físicas, sino también, de múltiples factores relacionados con el diseño, y en ocasiones, de las condiciones de entorno (política de stocks, experiencia y cualificación del personal, accesos, climáticatología).

La Mantenibilidad es una medida de la habilidad de retener o restaurar un item a las condiciones especificadas de funcionamiento usando los procedimientos prescri - tos y niveles de capacidad técnica. Desde un punto de vista más formal, se define como la probabilidad de que un item pueda ser restituido a sus condiciones de operación dentro de un periodo predefinido de tiempo bajo condiciones predeter - minadas de mantenimiento. (Schram, G - S03004)

Es representada por el MTTR (Mean Time To Repair); representa el downtime, en unidades de tiempo, asociado al mantenimiento realizado. Una medida a ser mini - mizada será el tiempo medio utilizado para reparar *(1 / MTTR).*

El problema de minimización del downtime es complejo dado que depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capa - cidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambien - tales, otros). Es importante, por tanto, una acertada planificación de la O&M.

- **Seguridad-Soportabilidad (Safety: S).**

La componente -S en el término RAMS puede ir asociada a Seguridad o Sopor - tabilidad; su asignación dependerá de la naturaleza de la aplicación. El cálculo de la componente de Seguridad es realizado frecuentemente a través del análisis de riesgo.

El ROI_ M (Retorno de la Inversión en Mantenimiento) puede ser evaluado en base a la reducción del coste de la dimensión riesgo.

Por su parte, el gasto en mantenimiento, puede cuantificarse en base al coste de los recursos necesarios para las acciones de mantenimiento más los costes vinculados a las pérdidas de operación (Tam, A.S.B. and Price, J.W.H., 2008b):

$$ROI_M = \frac{\Delta(\textit{reducción del riesgo})}{\textit{Gasto en mantenimiento}} \qquad \textbf{(10)}$$

$$-\textit{Gasto en mantenimiento} = \text{coste de recursos} + \textit{pérdidas de operación}$$

Los costes de la dimensión riesgo serán función del coste de los recursos. Esta última variable de coste será la variable controlable en el proceso de optimización; será función de la calidad del mantenimiento.

El criterio para priorizar las alternativas será el de asegurar el máximo retorno en el gasto en mantenimiento en forma de reducción de riesgo bajo las restricciones contempladas (Tam, A.S.B. and Price, J.W.H., 2008b). Por tanto, es importante una buena comprensión de la relación coste del riesgo v.s. gasto en recursos para cada alternativa. Ello exige un modelo que posibilite un análisis exhaustivo de alterna - tivas y permita evaluar y comprender sus estructuras de costes.

El objetivo de la ingeniería (bajo el paraguas del ciclo de vida: enfoque concu - rrente) ha de ser el asegurar que el ciclo de vida total del sistema sea considerado

desde el principio. Este enfoque ha de integrar todos los factores necesarios (desempeño-performance, productividad, fiabilidad, mantenibilidad, factor humano, soportabilidad, calidad, etc.) para brindar, en función de las necesidades identifica - das, opciones de diseño viables. Consecuentemente, la ingeniería, en este contexto, implica una orientación hacia la gestión del ciclo de vida. Esta orientación, o diseño concurrente, lleva aparejado la convivencia del ciclo de vida del sistema técnico con el ciclo de vida de su sistema soporte. Por tanto, habrá que considerar la coordina - ción de tres ciclos de vida que progresan en paralelo, tal y como se ilustra el la figura 50:

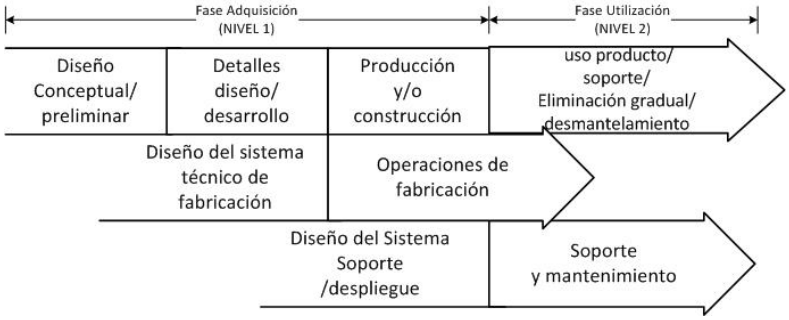


Figura 50: Ingeniería orientada al ciclo de vida (Ingeniería concurrente).
(Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991)

La fiabilidad y la mantenibilidad tienen una gran influencia sobre el coste del ci - clo de vida (Hansen, R.C., 2001).Por tanto, sería interesante la planificación coordina - da del mantenimiento y su soporte logístico en la fase conceptual del diseño.

Los aspectos económicos son muy importantes en la ingeniería de sistemas con objeto de garantizar la viabilidad económica del diseño. Existen numerosos ejemplos de estructuras, procesos y sistemas técnicos que muestran excelentes diseños físicos pero que no son viables económicamente (Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991).

El LCCA suministra la viabilidad económica de un sistema cuando se introduce como parámetro en el proceso de diseño.

2.4. Bases del modelo para la planificación y control de la O&M. Gestión dinámica del ciclo de vida de la STM+C seleccionada.

La competitividad está haciendo bascular el orden de importancia hacia el aseguramiento del estado, lo cual dependerá de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación.

Para mantener los máximos niveles de productividad y obtener el máximo retorno de la inversión, es necesario un Modelo de Gestión de Activos que:

1.- Traduzca, de forma efectiva, la información de los activos en conocimiento relevante y oportuno para la toma de decisiones ante estímulos externos y/o internos.

2.- Posibilite la planificación y control sistemático de un activo a lo largo de su ciclo de vida (Life Cycle Management). Incluye su especificación, diseño y construcción, operación, mantenimiento, modificación y eliminación.

3.- Favorezca una gestión proactiva alineada con la visión, misión y los objetivos. Ello implica un enfoque amplio que integre todas las partes de la organización: mantenimiento e ingeniería, producción/operación, calidad, compras, Stakeholders.

El principal reto a la hora de seleccionar y priorizar las tareas de mantenimiento será la cuantificación del ROI de la alternativa considerada. En esta investigación, el ROI_M se valora en base al nivel de reducción del coste del riesgo. La idea es

intensificar el concepto de "mantenimiento planificado" y "mantenimiento efectivo" (Conde Collado, et al., 2003) con objeto de reducir los costes potenciales asociados al downtime.

En el modelo desarrollado, la verdadera planificación se amplía (enfoque proactivo) para iniciarla con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas ("Guías de Requerimiento de Servicios") y la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planificación").

Estas guías serán excelentes documentos de referencia para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

3. MODELO DE REFERENCIA PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS DE DECISIÓN.

Atendiendo a los ejes de actuación de la función mantenimiento para la mejora de la competitividad y, de acuerdo con el *nuevo modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado* y el marco de referencia descritos, el modelo conceptual para la definición y diseño de los procesos de decisión para el diseño de la STM+C (nivel 1) y la planificación y control dinámico de la O&M (nivel 2), sería el siguiente (figura 51):

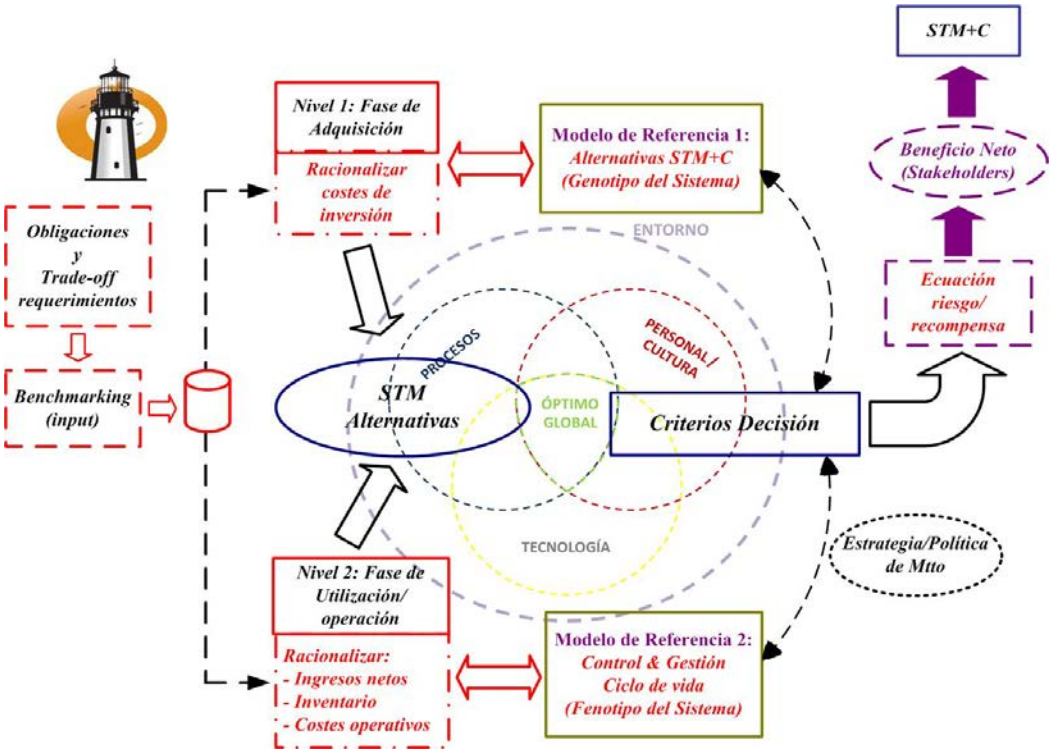


Figura 51. Modelo de Referencia para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida.

- **Nivel 1: Fase de adquisición. Definición de alternativas STM+C: Genotipo del sistema.** En este nivel se definirán las actuaciones a llevar a cabo durante la gestión de la inversión. Resulta interesante que, no sólo se consideren los requerimientos funcionales, sino que también se adapte y desarrolle el diseño para aumentar la disponibilidad, la fiabilidad y reducir los costes de mantenimiento en la fase de utilización/operación.

Será necesario evaluar diferentes alternativas de diseño con el fin de encontrar el mejor equilibrio coste total vs. desempeño (performance), para el ciclo de vida .

El objetivo es brindar soluciones óptimas globales y gobernables en el ciclo de vida establecido para el sistema.

Nivel 2: Fase de operación. Control y Gestión dinámica de la O&M de l sistema global: Gen otipo del sistema. El objetivo es mejorar el nivel de competencia de la planta/sistema mediante la búsqueda de alternativas, altamente optimizadas, para el equilibrio dinámico sistema – entorno (definir el fenotipo del sistema).

Para mejorar el nivel de competencia del sistema a través del equilibrio dinámico sistema – entorno, será necesaria una elevada capacidad de respuesta; ello exige disponer de un sistema de información, en la fase de operación, que brinde:

a. La máxima información relevante posible, de forma oportuna, clara, fiable y precisa.

b. Que permita simular escenarios de actuación técnico -económicos para investigar diferentes alternativas y buscar el mejor equilibrio entre coste total, desempeño y estrategia de mantenimiento, sobre el ciclo de vida establecido.

Para muchos tipos de información, el *proceso de decisión*, en sí, debe ser parte integral del sistema de información.

En este nivel se define y diseña el proceso de decisión y la plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M.

El objetivo es producir con menores costes que la competencia para mejorar el nivel de competitividad y favorecer la captación de clientes e inversores.

Un paso importante en la Gestión del Ciclo de Vida sería la identificación del interés y objetivos del cliente sobre un periodo de tiempo. Ello ayudaría a definir los criterios y la frontera temporal del diseño.

Hay dos tipos principales de entrada al proceso que pueden influir en los trade-off en el proceso de decisión:

- Requisitos obligatorios (mandatory). Las de obligado cumplimiento especifican las condiciones necesarias que debe tener toda solución para ser aceptada por el cliente: regulaciones, normas, presupuesto, etc.
- Especificaciones del cliente (trade-off requirements). Son condiciones que hacen que el cliente esté más satisfecho; marcan los elementos de valor, y por tanto, la ventaja competitiva de la solución propuesta.

Entre las ventajas del modelo, cabe destacar:

• Su aplicación en la planificación, con un enfoque estratégico e integral, de la explotación y mantenimiento de equipos.

• Dar soporte a la toma de decisiones y, en su caso, optimizar la explotación de equipos bajo criterios de fiabilidad, disponibilidad, seguridad pública y medioambiental, costes del ciclo de vida y criterios de explotación, plan de negocio de la empresa.

• Reducir los niveles de incertidumbre.

• Aumentar la confiabilidad del sistema y reducir los riesgos asociados a la operación.

CAPÍTULO III

PROCESO DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALTERNATIVAS STM+C. METODOLOGÍA I + I + D.

CAPÍTULO III: PROCESO DE DECISIÓN PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE ALTERNATIVAS STM+C. METODOLOGÍA I + I + D.

1. INTRODUCCIÓN.

En las fases Conceptual y Preliminar de cualquier proceso o sistema de nueva inversión es donde es más fácil incorporar o implementar un cambio o una mejora. Durante las fases de Detalle & Desarrollo del diseño y Producción y/o construcción, las influencias de las mejoras tienen mayores resultados, pero la facilidad para incorporarlas o aprobarlas son mínimas. Una vez el sistema es construido y se encuentra en fase de utilización, las posibilidades de mejorar su eficiencia son prácticamente nulas. De igual modo, en esta fase, es difícil justificar una nueva reforma, una modificación o una gran parada asociada. (Fabrycky, W.J. y Blanchard, B.S, 1991)

Por otro lado, probablemente, la mejor forma de reducir el coste total de un activo/sistema y aumentar su productividad, es reduciendo los costes de su manteni - miento y soporte logístico. (Tam, A.S.B. and Price, J.W.H., 2008b)

La Gestión de Activos (Asset Management) consiste en la organización del ciclo de vida de un activo con objeto de obtener, al mínimo coste y para el total del tiempo de vida asignado (ciclo de vida), la máxima disponibilidad, efectividad, productividad y la más alta calidad. Para conseguir los objetivos indicados, resulta fundamental un diseño apropiado (eficiencia) y un conocimiento de la estructura y composición de los Costes de su Ciclo de Vida.

La figura 52 describe, desde el punto de vista de la gestión de activos industriales, los costes totales vinculados a la adquisición de un activo:

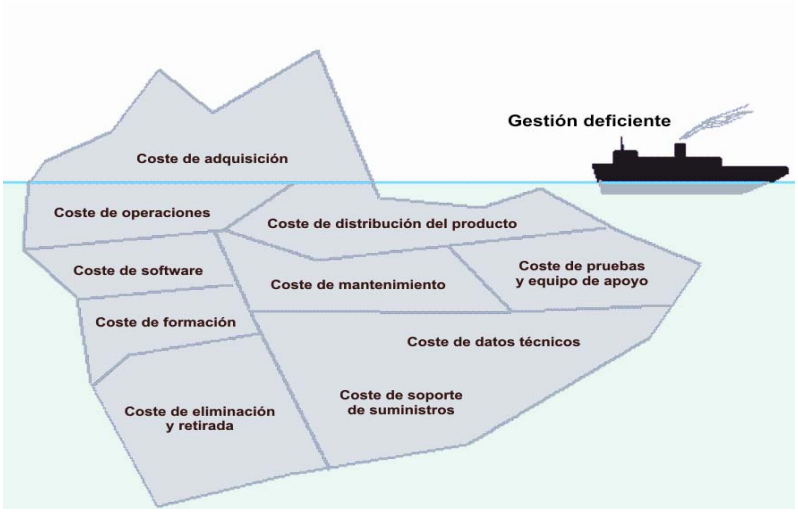


Figura 52: El iceberg de costes de un activo/sistema a lo largo de su ciclo de vida.

Como se observa, el coste total de un item a través de su ciclo de vida está formado no solamente por el "Coste de Adquisición", sino que hay que considerar otras categorías que quedan englobadas dentro de los denominados "Costes de Propie dad", como son: los costes de operación, mantenimiento, logística, soporte, etc.

Otra categoría de clasificación de costes al más alto nivel del CBS (Cost Break - down Structure), común para los sistemas técnicos de producción continua (plantas de producción de energía, gas, petróleo, parques eólicos, autopistas de peaje, etc.), es la

siguiente: “Costes de adquisición”, “Costes de operación” y “Costes diferidos de producción”. Esta última clasificación hace referencia a la penalización establecida en contrato por incumplimiento de las condiciones de suministro/servicio. Su cuantificación se hace, generalmente, sobre la base de la indisponibilidad de funcio - namiento del sistema técnico y una unidad de coste del producto/servicio. Su impacto sobre el LCC puede llegar a ser muy importante si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Luego, para este tipo de industrias, o similares, es un término muy importante a tener en cuenta en el cálculo de la “componente de coste total” del ciclo de vida del sistema.

Otra categoría de clasificación de costes puede incluir los “costes de peligrosidad o riesgo”, como sucede en la industria ferroviaria o la navegación aérea comercial.

Se extrae, como conclusión, que para que la STM propuesta cumpla con las funciones que se le exige a largo su ciclo de vida, a nivel técnico y económico, es necesario realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar, con objeto de: determinar y conocer sus principios de funcionamiento e identificar las categorías y la estructura de costes significativos.

La figura 52 pone de manifiesto que el Coste de Adquisición de un activo repre - senta una pequeña parte del coste total acumulado, en el tiempo de vida total del mis mo. Del análisis de los estudios de LCC, se extraen tres conclusiones básicas:

- Los Costes de Sostenimiento/Propiedad (Nivel 2)de un activo/sistema tienen un peso mayor que el precio de compra/adquisición.
- El Coste de Operación es mayor en comparación con el precio de compra.
- Los costes relevantes suelen ser costes ocultos. Ello pone de manifiesto la necesidad del uso de herramientas para el análisis, que ayuden:

• a una determinación rigurosa y precisa de las estructuras de costes. Para ello, es necesario partir de diseños óptimos a la hora de obtener el dato de coste.

• a descubrir “propiedades emergentes”, sinergias, diferencias competitivas, induc - tores de ingresos y costes.

• a la toma de decisiones informada, la identificación de ventajas competitivas, la selección de la mejor alternativa, tanto en la fase de diseño, como de utilización del sistema.

En un planteamiento orientado hacia el ciclo de vida del sistema (ingeniería concurrente), resulta evidente que las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un activo (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo (figura 53). Sin embargo, la práctica habitual en las decisiones de inversión, es tomar como base el precio de compra, lo cual se demuestra que re - presenta una pequeña parte del LCC.

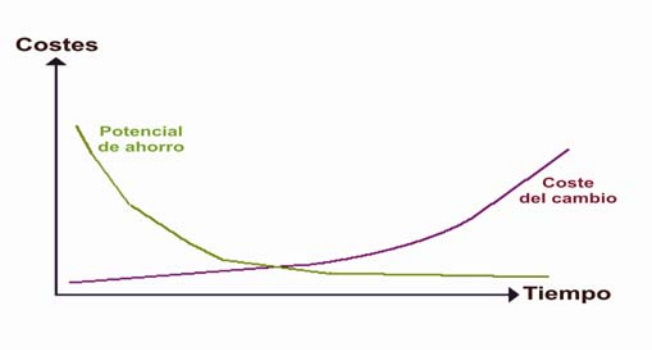


Figura 53: Beneficio de la detección temprana de problemas. La rentabilidad económica de la eficiencia.

La experiencia obtenida de la aplicación del análisis LCC durante los últimos 40 años demuestra que el 70%, o más, de los gastos de operación y los asociados a la falta de fiabilidad son comprometidos en las etapas de concepción y diseño del proyecto. La posibilidad de influir sobre estos costes se ve muy reducida una vez que el proyecto se ejecuta y pone en funcionamiento.

Resulta evidente, que las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un sistema/activo tienen el mayor impacto potencial sobre el LCC total del mismo, y por tanto, sobre la sostenibilidad de la inversión y los niveles potenciales de competiti - vidad.

En este capítulo se presenta un proceso de decisión para el diseño, de forma estructurada y base científica**,** de Soluciones Técnicas y de Operación & Manteni - miento Coste-efectivas (STM+C). La metodología está basada sobre la evolución gradual de los detalles de diseño.

El proceso de decisión está orientado hacia el ciclo de vida del sistema, en la fase de diseño, en base al interés y objetivos del cliente; está estructurado sobre una metodología de toma de decisiones multietapa basada sobre los últimos avances científicos. El resultado es un informe muy detallado de alternativas coste - efectivas (Alternativas STM+C) el cual incluye características técnicas, de operación, mante - nimiento y de coste total, para cada alternativa.

2. PROCESO DE DECISIÓN MULTIETAPA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE LA STM+C Y SU GAMA DE ALTERNATIVAS (NIVEL 1). METODOLOGÍA I + I + D.

2.0. Entorno metodológico. Ingeniería de sistemas.

(a) Sistema.

Un *sistema* es un objeto compuesto cuyos componentes se relacionan, con al menos, algún otro componente; puede ser material o conceptual. (Wiener, N., 1998)

Todos los sistemas tienen composición, estructura y entorno, pero sólo los sistemas materiales tienen mecanismo; y sólo algunos sistemas materiales tienen figura (forma). La mayoría de los sistemas comparten un conjunto de características comunes:

- Presentan *estructura.* Viene definida por los componentes del sistema y la composición de los mismos.
- *Funcionamiento/comportamiento*, lo cual implica entradas, procesamiento y salida de materiales, energía , información o datos.
- *Interconectividad.* Varias partes de un sistema pueden presentar relación es - tructural y funcional.
- *Mecanismos*. Algunos sistemas pueden tener funciones o grupos de funciones.

Las propiedades generales de los sistemas son estudiadas por la Teoría de sistemas, la Cibernética, la Dinámica de sistemas, la termodinámica y los sistemas complejos.

El concepto puede también referirse al conjunto de reglas que gobierna una estructura y/o funcionamiento, o al proceso, o conjunto de procesos, que transforma entradas en salidas. Las entradas son consumidas y las salidas son producidas.

Según el sistemismo, todos los objetos son sistemas o componentes de algún sistema.[1] Por ejemplo, un núcleo atómico, es un sistema material físico compuesto de protones y neutrones relacionados por la interacción nuclear fuerte; una célula, es un sistema material biológico compuesto de orgánulos relacionados por enlaces químicos no-covalentes y rutas metabólicas; un ejército, es un sistema material social,

y parcialmente artificial, compuesto de personas y artefactos relacionados por el mando, el abastecimiento, la comunicación y la guerra; el anillo de los números enteros, es un sistema conceptual algebraico compuesto de números positivos, negativos y el cero, relacionados por la suma y la multiplicación.
Norbert Wiener y Ross Ashby fueron los pioneros en el uso de las matemáticas en el estudio de los sistemas.

- ***Sistemas materiales.***

Un sistema material, sistema concreto o sistema real es una cosa [*] compuesta (por dos o más cosas relacionadas) que posee propiedades que no poseen sus componentes, llamadas *propiedades emergentes*; por ejemplo, la tensión superficial es una propiedad emergente que poseen los líquidos pero que no poseen sus moléculas componentes. Al ser cosas, los sistemas materiales poseen las propiedades de las cosas, como tener energía (e intercambiarla), tener historia, yuxtaponerse con otras cosas y ocupar una posición en el espacio - tiempo.

El esfuerzo por encontrar leyes generales del comportamiento de los sistemas materiales es el que funda la teoría de sistemas y, más en general, el enfoque de la investigación científica a la que se alude como sistemismo, sistémica o pensamiento sistémico, en cuyo marco se encuentran disciplinas y teorías como la cibernética, la teoría de la información, la teoría del caos, la dinámica de sistemas y otras.

- ***Análisis CEEM.***

El análisis más sencillo del concepto de sistema material es el que incluye los conceptos de Composición, Entorno, Estructura y Mecanismo (CEEM, por sus siglas). La *composición de un sistema,* es el conjunto de sus partes componentes. *El entorno o ambiente de un sistema,* es el conjunto de las cosas que actúan sobre los componentes del sistema, o viceversa (sobre las que los componentes del sistema actúan). La amplitud de un sistema viene determinada por su frontera. La *frontera* es la línea que determina qué es lo que está dentro o fuera del sistema. *La estructura interna, o endoestructura de un sistema,* es el conjunto de relaciones entre los componentes del sistema. *La estructura externa, o exoestructura de un sistema,* es el conjunto de relaciones entre los componentes del sistema y los elementos de su entorno. *La estructura total de un sistema,* es la unión de su exoestructura y su endoestructura. Las relaciones más importantes son aquellas que afectan a los componentes relacionados (vínculos o enlaces); las relaciones espaciotemporales no son vínculos. *El mecanismo de un sistema* es el conjunto de procesos internos que le hacen cambiar algunas propiedades, mientras que conserva otras.

Además, *la frontera de un sistema,* es el conjunto de componentes que están directamente vinculados (sin nada interpuesto) con los elementos de su entorno. La frontera de un sistema físico puede ser rígida o móvil, permeable o impermeable, conductor térmico (adiabática) o no, conductor eléctrico o no, e incluso puede ser aislante de frecuencias de audio.

Además, algunos sistemas tienen figura (forma); pero no todo sistema con frontera tiene necesariamente figura.

Si hay algún intercambio de materia entre un sistema físico y su entorno a través de su frontera, entonces el sistema es abierto; de lo contrario, el sistema es cerrado.

[1] Darwin, Charles (1859). « On the origin of the species >>, John Murray.

[*] En ontología, una *cosa, objeto concreto u objeto material,* es un individuo sustancial dotado con todas sus propiedades sustanciales; en particular, la propiedad de cambiar. El concepto de cosa sintetiza los conceptos filosóficos clásicos de sustancia y forma. Según el materialismo, el mundo está compuesto exclusivamente por cosas; y ser, existir realmente, es idéntico a ser una cosa (por lo que no ser es idéntico a fallar en ser una cosa).[1] Por ejemplo, los átomos, las moléculas, las células, los sistemas nerviosos, los seres humanos, las máquinas y las sociedades son cosas.

Si un sistema cerrado tampoco intercambia energía, entonces el sistema es aislado. En rigor, el único sistema aislado es el universo.

Un sistema es *autopoyético*, si posee la organización necesaria para controlar(mientras las perturbaciones producidas desde su entorno no superen cierto grado)su propio desarrollo, asegurando la continuidad de su composición y estructura (homeostasis) y la de los flujos y transformaciones con que funciona (homeorresis).

(b) Complejidad. Sistemas complejos.

La definición de la *complejidad* aparece normalmente vinculada al concepto de sistema. En el campo científico, el concepto de complejidad es utilizado para referirse a un sistema formado por un conjunto de elementos en un orden o combinación compleja/complicada con interacciones entre las partes. El concepto tiene interpretaciones diferentes en función del campo científico. Así, por ejemplo, en procesamiento de la información, la complejidad es una medida del número total de propiedades transmitidas por un "objeto" y detectadas por un "observador". A este conjunto de propiedades se les denomina "estados". El estudio de las relaciones/co - nexiones complejas entre las diferentes partes o elementos es el objetivo principal de la Teoría de redes.

El uso del término complejo se confunde a veces con el término complicado. En los sistemas actuales, para aclarar la diferencia se establece que complejo es lo opuesto de independiente, mientras que complicado es lo contrario de simple.

- ***Sistema complejo.***

Un *Sistema Complejo* está compuesto por varias partes *interconectadas* o *entrelazadas* cuyos vínculos crean información adicional no visible antes por el observador. Como resultado de las interacciones entre elementos, surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. Dichas propiedades se denominan *propiedades emergentes*.

Según Warren Weaver **[**]**, la complejidad en los sistemas complejos puede ser de dos formas: Organizada y desorganizada.

El *sistema complicado,* en contraposición, también está formado por varias partes pero los enlaces entre éstas no añaden información adicional. Nos basta con saber cómo funciona cada una de ellas para entender el sistema (Propiedad de superposi - ción).

En un sistema complejo, en cambio, existen variables ocultas cuyo desconocimiento nos impide analizar el sistema con precisión. Así pues, un sistema complejo posee más información que la que dá cada parte independientemente. Como postulaba Aristóteles: "El todo es más que la suma de las partes".Para describir un sistema complejo hace falta, no solo conocer el funcionamiento de las partes, sino conocer como se relacionan entre sí. En la práctica sucede que, en general, cada uno de los subsistemas (operación /fabricación, mantenimiento, marke- ting, etc.) está bien estudiado, pero se desconoce la forma en que interactúan y hacen evolucionar al sistema global. Hay, pues, mucha más información oculta en esas interrelaciones (a nivel tanto de subsistema, como entre subsistemas y de sistema y medio) que pueden llegar a definir propuestas de valor que permitan diferencias claves con respecto a la competencia (fuentes potenciales de competitividad).

[**] Warren Weave, científico americano, matemático, ampliamente reconocido como uno de los pioneros de las máquinas de traducción *(MT: machine traslation).*

- ***Características básicas de los sistemas complejos.***

Los sistemas complejos se caracterizan por las siguientes propiedades:

- *Dificultad para determinar sus límites/ frontera.*

Es difícil determinar los límites de un sistema complejo. La decisión es tomada, en última instancia, por el observador.

- *Son sistemas usualmente abiertos.*

Un sistema abierto es aquel que interacciona con otros agentes; por lo tanto, está interconectado con otros factores externos a él. Una propiedad importante de estos sistemas es que las ecuaciones de evolución temporal (ecuaciones de movimiento) no dependen de variables y factores contenidos en el sistema. En otras palabras, los sistemas abiertos suelen estar lejos del equilibrio energético.

Por el contrario, un sistema cerrado, no interacciona con otros agentes situados fuera de él, y por tanto, no está conectado "causalmente" ni correlacionadamente con nada externo a él. Una propiedad importante de estos sistemas es que las ecuaciones de evolución temporal ecuaciones de movimiento) dependen sólo de variables y factores contenidas en el sistema. En este tipo de sistemas se cumple el principio de conservación de la energía.

- *Son sistemas que exhiben histéresis (memoria).*

Al ser los sistemas complejos sistemas dinámicos cambian con el tiempo. El estado presente suele estar influenciado por el estado anterior, por lo que la "historia del sistema" es importante. Dicho de modo más formal, presentan histéresis.

En un sistema con histéresis, la salida depende, en parte, del estado interno del sistema, y no sólo de la entrada. No hay manera de predecir la salida del sistema sin tener en cuenta la historia de la entrada (para determinar la ruta que siguió la entrada antes de que alcanzara su valor actual) o inspeccionando el estado interno del sistema.

- *Pueden estar anidados.*

Los componentes de un sistema complejo pueden, por sí mismos, ser sistemas complejos. Por ejemplo, la economía está formada por organizaciones, las cuales a su vez están formadas por personas, que a su vez están formadas por células. La economía es un sistema complejo constituido por un conjunto de sistemas complejos anidados.

- *Pueden presentar diferentes topologías de red (dinámica de interconexiones).*

Dos aspectos importantes son las reglas de interconexión entre las diferentes partes y la dinámica de las interconexiones.

- *Producen fenómenos emergentes.*

Los sistemas complejos pueden manifestar comportamientos que son "emergentes", lo que equivale a decir que, aunque los resultados pueden ser determinados por la actividad de los elementos básicos, hay determinadas propiedades (propiedades emergentes) que no pueden ser explicadas por el principio de superposición, teniendo que recurrirse a un nivel de análisis superior.

- *La relación es no - lineal.*

En los sistemas complejos no existe una relación de proporcionalidad (la salida no es proporcional a la entrada) entre el efecto y la causa. En términos prácticos, una pequeña perturbación puede generar un gran efecto (efecto mariposa), un efecto proporcional o ningún efecto. Los sistemas no lineales no están sujetos, en su comportamiento, al principio de superposición.

- *Las relaciones contienen lazos de retroalimentación(positivo y negativo) que posibilitan la evolución o coevolución de los elementos interconectados.*

(c) Ingeniería de sistemas *(systems engineering)***.**

El término *systems engineering* se remonta a Bell Telephone Laboratories, en 1940. La necesidad de identificar y manipular las propiedades de un sistema como un todo(lo que en sistemas complejos puede ser diferente de la suma de las partes), motivó al Departamento de Defensa americano, NASA, y a otras industrias, a aplicar esta disciplina. Comenzó a desarrollarse en la segunda parte del siglo XX con el rápido avance de la ciencia de sistemas.

La ingeniería de sistema considera un sistema como un todo integrado por estructuras diferentes y especializadas. Reconoce que cada sistema tiene un número de objetivos y que el equilibrio entre ellos puede diferir ampliamente de un sistema a otro. La metodología busca la optimización de las funciones del sistema global atendiendo a la ponderación de los objetivos y la máxima compatibilidad de sus partes. (Chestnut, Harold ,1965)

Se trata de un campo interdisciplinar de la ingeniería que se centra en el diseño y la gestión del ciclo de vida de proyectos de ingeniería complejos. Es una aproximación robusta hacia el diseño, creación y operación de sistemas mediante la identificación y cuantificación de los objetivos del sistema, la creación de conceptos de diseño alternativos, la valoración de los trade-off de desempeño (tasas de intercambio) de las alternativas, selección e implementación del mejor diseño, verificación de que el diseño es propiamente construido e integrado, y la evaluación de la post-implementación para comprobar de que el sistema cumple con los objetivos fijados(NASA, 1995). "Es Arte y Ciencia de creación de soluciones óptimas a cuestiones y problemas complejos " *(Derek Hitchins, Prof. of Systems Engineering, former president of INCOSE (UK), 2007).*

La ingeniería de sistemas integra, con la filosofía de trabajo en equipo, otras disciplinas y grupos de especialidad, formando un proceso de desarrollo estructurado.

Una definición especialmente completa (data de 1974) nos la ofrece un estándar militar de las fuerzas aéreas estadounidenses sobre gestión de la ingeniería. La Ingeniería de Sistemas es la aplicación de esfuerzos científicos y de ingeniería para:
(1) transformar una necesidad de operación en una descripción de parámetros de rendimiento del sistema y una configuración del sistema a través del uso de un proceso interactivo de definición, síntesis, análisis, diseño, prueba y evaluación;
(2) integrar parámetros técnicos relacionados para asegurar la compatibilidad de todas las interfaces de programa y funcionales de manera que optimice la definición y diseño del sistema total;
(3) integrar factores de fiabilidad, mantenibilidad, seguridad, supervivencia, huma - nos y otros en el esfuerzo de ingeniería total a fin de cumplir los objetivos de coste, planificación y rendimiento técnico.

Una de las principales diferencias de la ingeniería de sistemas respecto a otras disciplinas de ingeniería tradicionales, consiste en que la ingeniería de sistemas no construye productos tangibles. Trata con sistemas abstractos con ayuda de las metodologías de la ciencia de sistemas. Por tanto, otro ámbito que caracteriza a la ingeniería de sistemas es la interrelación con otras disciplinas en un trabajo transdis - ciplinario.

- ***Campos relacionados y subcampos.***

Muchos campos están relacionados estrechamente con la ingeniería de sistemas. Estas áreas han contribuido a su desarrollo como entidad:

- *Ingeniería de sistemas cognitivos (CSE).* Se ha convertido, desde sus inicios , en una disciplina científica reconocida; también se le conoce como Ingeniería Cognitiva. Se enfoca específicamente a la descripción y el análisis de los sistemas hombre-máquina o de los sistemas socio-técnicos (Hollnagel, E. & Woods, D. D. ,1983). Los tres temas principales son: cómo los seres humanos se comportan frente a la complejidad; cómo es realizado el trabajo mediante el uso de artefactos; y cómo los sistemas hombre-máquina y los sistemas socio-técnicos pueden ser descritos como conjunto de sistemas cognitivos. Los más de 20 años de experiencia con el CSE se han descrito ampliamente en Hollnagel, E. & Woods, D. D. (2005) y Woods, D. D. & Hollnagel, E. (2006).
- *Gestión de la Configuración (CM).* Se centra en la captura de los requerimien – tos, la trazabilidad de los elementos desarrollados y su auditoría para comprobar que han realizado las funciones solicitadas.
- *Ingeniería industrial* .Es una rama de la ingeniería que trata con la optimización de procesos complejos o sistemas. Se centra en el desarrollo, mejora, implementa - ción y evaluación de sistemas integrados por personas, capital, conocimiento, información, equipos, energía, materiales y procesos.
- *Diseño de interfaz.*
- *Investigación Operativa.*
- *Ingeniería Mecatrónica.* El Estándar francés NF E 01-010 da la siguiente defini – ción: "enfoque destinado a la integración sinérgica de la mecánica, la electrónica, la teoría de control, y la informática en el diseño y fabricación de productos, con el fin de mejorar y / u optimizar su funcionalidad. Es un campo multidisciplinar de la ingeniería.
- *Proposal engineering (Propuesta de ingeniería).* Es la aplicación de principios científicos y matemáticos para diseñar, construir y operar sistemas coste efectivo. Básicamente, utiliza el "proceso de ingeniería de sistemas" para crear una propuesta efectiva de costos y aumentar las probabilidades de éxito.
- *Ingeniería de Fiabilidad.*
- *Ingeniería de Seguridad (Security & Safety).*
- *Ingeniería del Software.*

- ***La toma de decisiones.***

Las decisiones tomadas al comienzo de un proyecto, cuyas consecuencias pueden no haber sido entendidas claramente, tienen una enorme implicación en la vida del sistema. Por tanto, se debe explorar estas cuestiones y tomar decisiones críticas. No hay métodos que garanticen que las decisiones tomadas hoy serán válidas cuando el sistema entre en servicio años o décadas después de ser concebido, pero hay meto - dologías que ayudan al proceso de toma de decisiones.

- ***Visión holística.***

Como adjetivo, *holística* significa una concepción basada en la integración total frente a un concepto o situación. El holismo enfatiza la importancia del todo, que es más grande que la suma de las partes (propiedad de sinergia) y da importancia a la interdependencia de éstas.

La Ingeniería de Sistemas se centra, al inicio, en el análisis y la obtención de las necesidades del cliente y la funcionalidad requerida, documentación de requisitos,...

para proceder, a posteriori, a la síntesis del diseño y validación del sistema en base al ciclo de vida del mismo (problema completo). Oliver et al. (1997), afirma que el proceso de ingeniería de sistemas se puede descomponer en dos tipos:

- *Ingeniería de Sistemas de Proceso Técnico (Figura 54):*

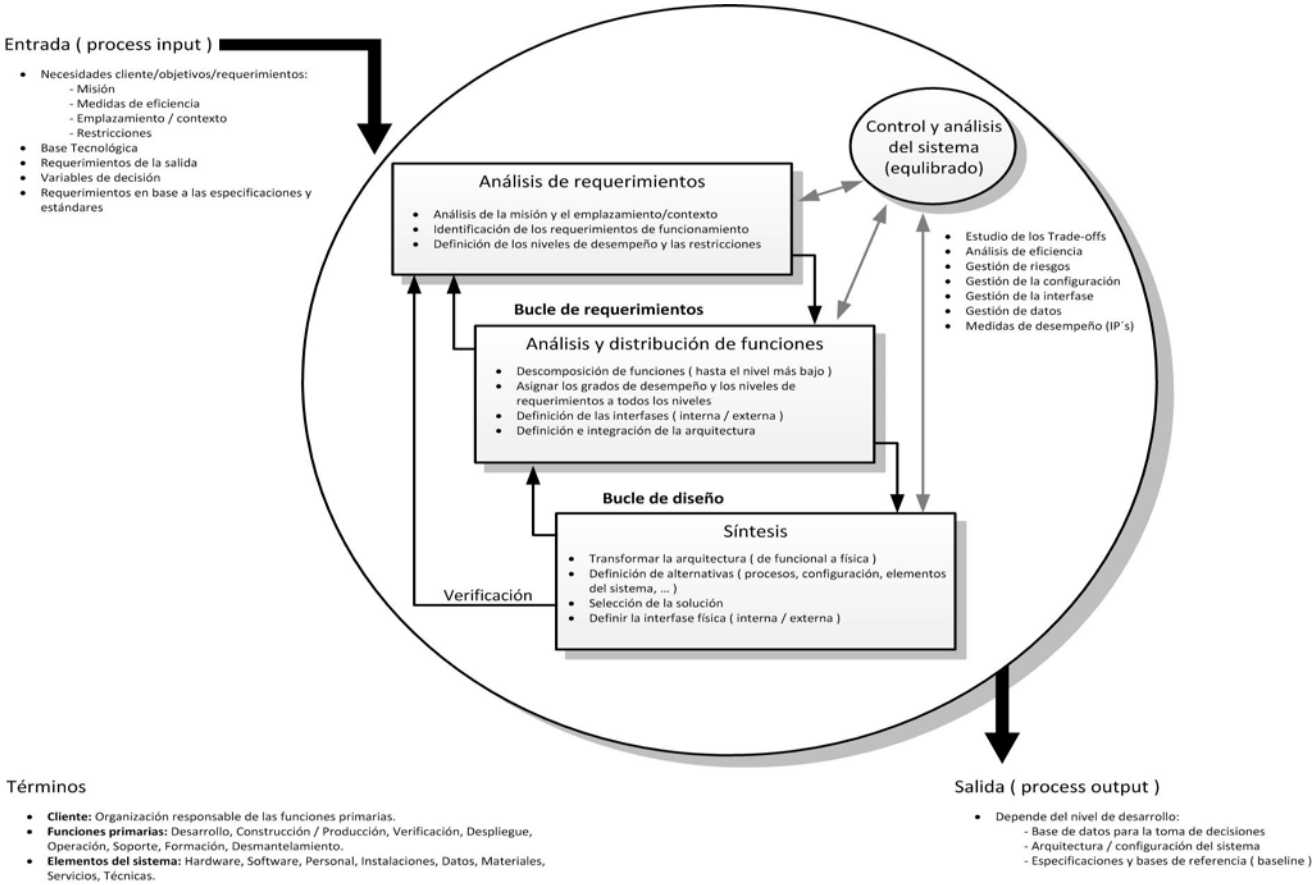


Figura 54: Ingeniería de Sistema de Procesos.

- *Ingeniería de Sistemas de Gestión de Procesos (Figura 55):*

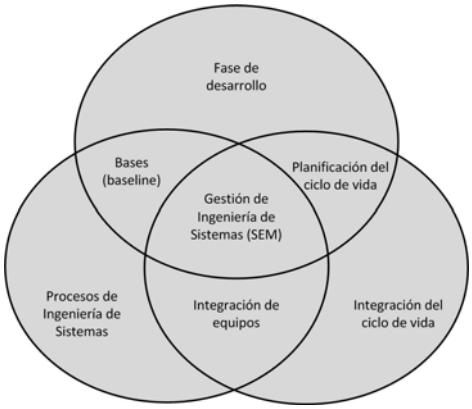


Figura 55: Árbol de actividades de la Ingeniería de Sistema de Gestión.
(**Systems Engineering Fundamentals. Defense Acquisition University Press, 2001)**

Dentro del modelo, el objetivo del *Proceso de Gestión* es organizar el funciona - miento técnico en el ciclo de vida; mientras que el *Proceso Técnico*, incluye la

evaluación de la información disponible, la definición de medidas de efectividad, crear un modelo de funcionamiento, crear un modelo de estructura, analizar las tasa de intercambio (trade-off) de desempeño-performance, y construir una estructura se - cuencial y un plan de evaluación.

Dependiendo de su aplicación, aunque hay varios modelos que se utilizan en la industria, todos ellos tienen como objeto identificar la relación entre las diversas etapas e incorporar retroalimentación. Ejemplos de estos modelos incluyen el modelo de cascada (Waterfall model) y el modelo de la EEV (V- Model: Figura 56):

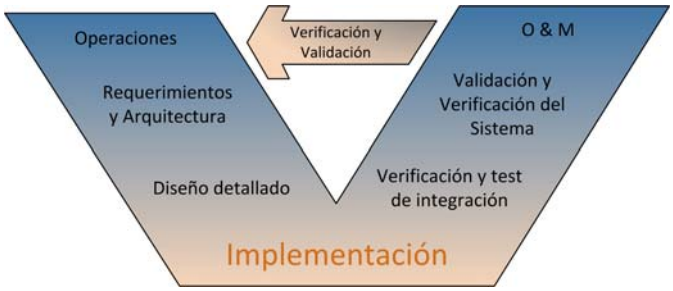


Figura 56: V- Model en Proceso de Ingeniería de Sistemas.

- ***Campo interdisciplinar.***

El desarrollo de sistemas requiere de la participación de diferentes disciplinas técnicas para obtener una visión holística de las necesidades. (Ramo, Simon; Robin K. St.Clair, 1998)

Se deben formar equipos de trabajo multidisciplinares para un diseño estructurado que contemple las diferentes etapas: concepto, producción, procesos y desmantelamiento. Es fundamental el manejo de las técnicas de trabajo en equipo para modelar las diferentes contribuciones técnicas en un diseño unificado.

- ***Gestión de la complejidad.***

La ingeniería de sistemas surge con el aumento de la complejidad de los sistemas y proyectos. En este contexto, la complejidad no sólo contempla los sistemas de ingeniería, sino también la organización lógica humana de los datos. Al mismo tiempo, un sistema puede llegar a ser más complejo debido a un aumento de tamaño, así como con un aumento en la cantidad de datos, variables, o el número de campos que están involucrados en el diseño, la sensibilidad a los tiempos de respuesta para atender las demandas del mercado, etc.

Para comprender y gestionar mejor la complejidad de los sistemas, la ingeniería de sistemas fomenta el uso de herramientas y métodos específicos. Algunos ejemplos de estas herramientas son:

- Modelo del sistema: modelado y simulación.
- Arquitectura del sistema.
- Optimización.
- Dinámica de sistemas.
- Análisis de sistemas.
- Análisis estadístico.
- Análisis de fiabilidad.
- Toma de decisiones.

La ingeniería de sistemas es compleja ya que el comportamiento y la interacción entre los componentes del sistema no siempre esta bien definida o es correctamente entendida. La definición y caracterización de sistemas y subsistemas y las intera -

cciones entre ellos es uno de los objetivos de la ingeniería de sistemas. Se utiliza como puente para cubrir el hueco que existe entre los requisitos informales de los usuarios, operadores, organismos de comercialización y las especificaciones técnicas.

- ***Uso de modelos.***

El uso de modelos (de bloques, funcionales, matemáticos, económicos, otros) desempeña un papel importante en la ingeniería de sistemas (verificación de un diseño, estudios de los trade-off de alternativas, simulación de escenarios, propor - cionar estimaciones de la eficacia del sistema, atributos de rendimiento o técnicos, costo, etc.).Por lo general, son necesarios modelos diferentes para proporcionar los resultados a las variables. Idealmente, las relaciones expresan causalidad, no sólo correlación.

La Ingeniería de Sistemas ha sido un método estándar en los procesos de diseño en la industria química y nuclear. Las técnicas RAMS y LCC han sido parte de la Ingeniería de Sistemas para calcular y proporcionar evidencia del nivel de desem - peño de los sistemas diseñados.

2.1. Integración RAMS + LCC en el proceso de diseño. Modelos conceptuales.

Los conceptos de RAMS y LCC pueden ser usados dentro del proceso de decisión, en la fase de diseño, para realizar un trade-off entre el desempeño-performance (componente de valor) y el coste total (componente de coste total) del sistema. RAMS y LCC, son métodos utilizados para cuantificar el desempeño y diferentes categorías de costes, tales como coste inicial, coste de mantenimiento y coste de operación. Resulta evidente, que cuando la Alta dirección conoce todas las categorías de costes que pueden aparecer durante el ciclo de vida de un activo, y dichos costes son tratados (inflación, impuestos) y convertidos a “valor presente”, disponen de información oportuna y relevante para cuantificar las alternativas y sele- ccionar la configuración óptima. (Taylor, W. ,1981)

Existe un conjunto de modelos conceptuales desarrollados por otros investiga - dores que integran RAMS y LCC en el proceso de diseño.

Uno de los primeros modelos fue el propuesto por Kaufman (1970). Es propues - to como una herramienta para la toma de decisiones; consta de ocho pasos orien - tados a obtener el LLC completo para la adquisición de equipos. En el primer y segundo paso considera dos factores: el perfil de operación (mode of the operating profile) y el factor de utilización. El tercer paso describe las categorías de costes que han de ser identificadas. Posteriormente, se identifican los parámetros RAMS y se convierten en parámetros de costes. Este paso es muy importante en el modelo. El desempeño (performance) se cuantifica en término de coste incurrido; por ejemplo, los costes de mantenimiento para paradas no planificadas. En el último paso todas las categorías de costes se suman. El trade-off se realiza en base a la componente de coste total de un activo, la cual viene representada por varias categorías, tales como: coste de adquisición, coste de operación, coste de mantenimiento, coste de grandes paradas y coste de repuestos iniciales.

Otro modelo enfocado al desarrollo de productos fue descrito por Markeset & Kumar (2003). Es un modelo algo más abstracto y más orientado a RAMS. El objetivo es entregar productos documentados en término de calidad, fiabilidad, mantenibilidad y LCC competitivo. Identifican la necesidad de un cambio cultural dentro del diseño y desarrollo de productos con objeto de poder introducir un modelo que ponga el acento en el análisis basado en el riesgo. Los resultados del FMECA (Failure Mode Effects and Criticality Analysis) son usados para tomar decisiones, tales

como: recomendaciones sobre mantenimiento preventivo, stock económico de repuesto, documentación y predicciones sobre LCC.

Un modelo más reciente para la aplicación de RAMS en proyectos de infraestructura, fue descrito por Ogink & Al-Jibouri (2008).Está muy vinculado a la industria de la construcción. Proponen dos modelos: uno, para contratos sin mantenimiento (D & C contracts); y otro, para contratos que incluyen mantenimiento (DBMcontracts).El modelo integra RAMS + LCC en el proceso de evaluación de diferentes alternativas de diseño. Toma como referencia procesos de diseños estándar. El proceso de evaluación de alternativas se realiza sobre la base de RAMS, que forma parte del proceso de diseño, y otros requerimientos que son especificados. El modelo está en la órbita de la ingeniería de sistemas.

RAMS es utilizado en la Ingeniería de Sistemas para indicar el desempeño del sistema diseñado. Hay algunos casos de contratos integrados donde el cliente especifica cuantitativamente determinados factores de RAMS para exigir certeza al contratista y que son utilizados para la selección del proyecto en la fase de concurso.

2.2. Observaciones generales. Hipótesis básicas.

El modelo desarrollado en este trabajo de investigación, para el nivel 1, toma como marco de referencia el de la ingeniería de sistemas y los modelos descritos con anterioridad; de modo especial, el propuesto por Ogink & Al-Jibouri(2008). Son generalizados para ampliar la naturaleza y el rango de los sistemas técnicos a tratar. Se parte de dos supuestos básicos:

- el analista dispone de grados de libertad en el diseño (y en la negociación de las condiciones del contrato).
- El analista, tanto en la fase inicial (Nivel 1), como en la posterior (Nivel 2), ha de tratar con un problema MCDM complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones y con objetivos normalmente en conflicto. En este contexto, un proceso de decisión bien estructurado y completo será extremadamente importante para apoyar, de forma informada, la toma de decisiones en el nivel 1, debido a su impacto sobre los resultados económicos en un entorno complejo y de alta competitividad.

Se propone, como elementos claves del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C con objeto de garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo: el análisis de las garantías de desempeño para cada alternativa, la construcción/formulación de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonus), el análisis de escalabilidad (para adaptar la evolución del sistema a las disponibilidades presupuestarias y las demandas dinámicas del mercado) y el R - LLCA (Análisis LCC basado en el análisis de riesgos).

Los procedimientos y el conjunto de “técnicas semicuantitativas” a aplicar dependerán de la naturaleza del sistema, el rango y alcance del estudio. Los costes y complejidad del proyecto determinarán el nivel de detalle en el análisis de las componentes de valor y de coste total, respectivamente.

Para obtener la alternativa más deseable, y la gama de alternativas vinculadas con las que dar respuesta a los procesos de adaptación evolutivos inducidos por estímulos internos y/o externos, se propone la simulación de escenarios multivariables.

En este nivel se propone un proceso de decisión con dos fines, en función de que las decisiones haya que tomarlas a priori o posteriori:

- *A priori.* Generar información para apoyar las decisiones en la fase de adquisición:
  - *Diseño STM+C y Gama de alternativas* confiables, escalables y flexibles que

den respuesta efectiva y eficiente a los "Requerimientos del Cliente" y a las demandas dinámicas del mercado.

- Para el caso de contratos integrados, además, dos elementos claves:

1) las "Guías de Requerimiento de Servicios" y las "Guías de Planificación" como documentos de referencia para el desarrollo del programa de preventivo.
2) Las ecuaciones de compensación en base a las garantías de desempeño.

- *A posteriori.* Si la decisiones hay que tomarlas a posteriori (sistema ya existen - te): Definir el "genotipo técnico y económico" para estimar su capacidad y las acciones e inversiones a emprender ("consejos genéticos": retrofit and refur - bishment).

El objetivo principal del modelo es brindar STM+C documentadas a nivel de disponibilidad, política de mantenimiento, riesgo específico, costes diferidos (pena - lizaciones) y coste total.

El modelo está pensado para un entorno multidisciplinar; ello exige combinar metodologías tanto cualitativas (básicamente en la "Fase de expansión") como cuantitativas (en las Fases de focalización).

2.3. Fases del modelo.

El objetivo principal del modelo es brindar al analista una herramienta para dos fines básicos:

a) investigar, comparar, innovar y diseñar configuraciones: obtener alternativas STM+C.

b) Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total, para el ciclo de vida establecido.

La figura 57 muestra todas las fases del proceso, independientemente del tipo, dimensión y complejidad del sistema. El modelo propuesto es de propósito general, por lo que los conceptos han de ser adaptados a la naturaleza del sistema, alcance y rango del proyecto, con objeto de garantizar la máxima efectividad.

El modelo describe cinco fases diferentes de la etapa de diseño (Nivel 1):

0. Benchmarking: Etapa de Investigación (I).
1. Fase de diseño Conceptual: Etapa de Innovación (I).
2. Fase de diseño Preliminar (Advanced development),
3. Fase de diseño Definitivo (Detail design & Development)
4. Fase de Ejecución.

La orientación del proceso, y los pasos usados, dependerán de la naturaleza del sistema, del conocimiento y, la experiencia de los miembros del equipo nuclear de proyecto. Esto justifica el hecho de que el proceso de selección del equipo nuclear de proyecto ha de ser riguroso, objetivo e independiente. A medida que se avanza en el proceso de diseño se podrá decidir la incorporación, a demanda y de forma transi - toria, de determinados especialistas como asesores del equipo nuclear.

En la fase 3, con la información obtenida de los modos de fallo, y sus consecuen - cias para una alternativa y una rigurosa comprensión de la relación costes de riegos *(RDC)* vs. coste de recursos (Re*DC*), para cada alternativa, es donde se definen las garantías de desempeño y se formulan las ecuaciones de compensación.

El proceso es iterativo para facilitar una apropiada realimentación que incorpore un "refinamiento top-down"en los detalles de diseño, a nivel de sistema, subsistema y componentes, para favorecer la "convergencia fuerte"hacia la configuración óp - tima.

Hay dos tipos principales de entrada al proceso que pueden influir en los trade-off en el proceso de decisión: las de “obligado cumplimiento” (mandatory) y las de “valor” (trade-off requirements). Las de obligado cumplimiento especifican las condiciones necesarias que debe tener toda solución para ser aceptada por el cliente. Las de “valor”, son condiciones que hacen que el cliente esté más satisfecho; marcan los elementos de valor, y por tanto, la ventaja competitiva de la solución propuesta.

Sobre la base de los requerimientos y necesidades, el modelo propone, como primer paso (Investigación), comenzar con un estudio de Benchmark con objeto de tomar como referencia procesos de diseños estándar. La adopción, de forma conveniente, de las mejores prácticas, contribuirá a construir diseños adaptados, de mejor calidad y más coste efectivos sobre la base de diseños estándar en O&M.

La definición funcional del sistema, subsistema y sus componentes, será utilizada para apoyar (baseline) la definición y cuantificación de los recursos requeridos en el Nivel 2 (hardware, software, personal, datos, etc.)

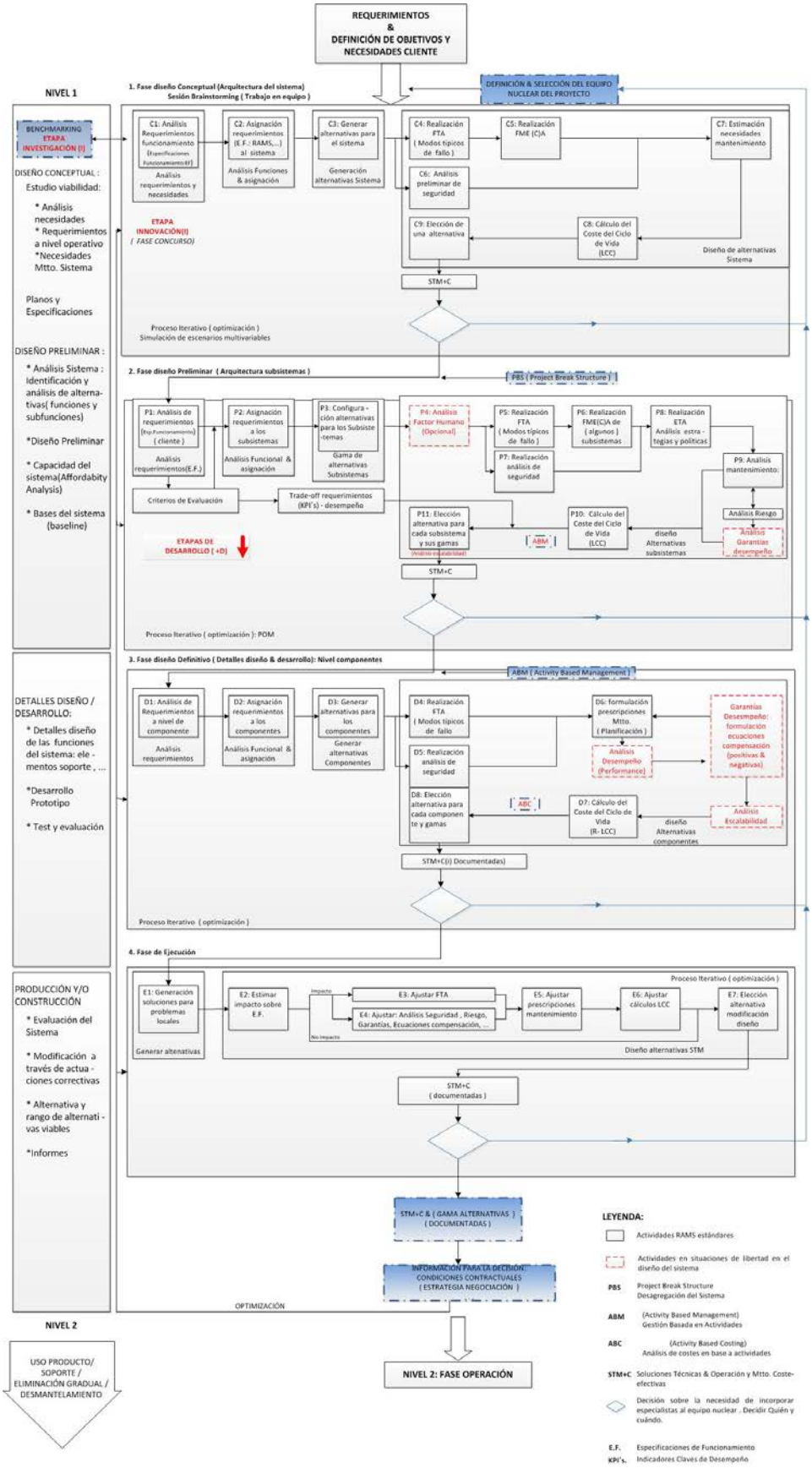


Figura 57: Proceso de Decisión para el diseño STM+C. "Metodología I+ I+ D" de toma de decisiones multietapa. Trade-off basado sobre las componentes de valor (KPIs) y coste total (R - LCCA).

0. Benchmarking: Etapa de Investigación (I).

Con objeto de que la STM propuesta cumpla con las funciones (a nivel técnico y económico) que se le exigirá a largo del ciclo de vida, es necesario realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar, para determinar y conocer: los principios de funcionamiento, identificar las categorías y la estructura de costes significativos, la/s causa raíz de los modos críticos de fallos potenciales, etc.

La adopción, de forma conveniente, de las mejores prácticas ayudará a construir diseños adaptados, más confiables, de mejor calidad y más coste efectivos en O&M.

El benchmarking es definido como un proceso sistemático y continuo de medida y comparación de unos procesos frente a otros que se toman como referencia por ser los líderes del sector. El objetivo es la identificación, por comparación con la referencia, de las debilidades y fortalezas de los procesos (Anderson and Pettersen, 1996). Es una herramienta de información útil no solamente para soportar los programas de mejora continua y reingeniería de procesos de negocio (BPR), sino que también influye sobre la actitud y comportamiento de las personas.

Es una técnica que puede ser utilizada para investigar métodos óptimos de gestión y prácticas de mantenimiento para la mejora de la efectividad total y la calidad de la O&M en planta.

Uno de los factores críticos del éxito en la aplicación de esta herramienta es evitar la transferencia directa de las mejores prácticas (copia) sin una adaptación previa a las especificidades del sistema en proyecto (copia vs. adaptación). Por este motivo, se propone los siguientes cinco pasos para la definición del plan estratégico de mejora en la fase de diseño del sistema (figura 58):

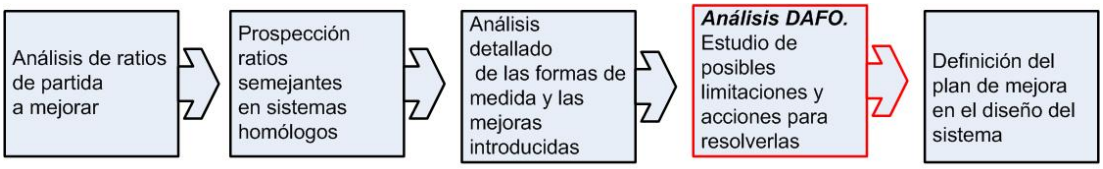


Figura 58: Esquema conceptual para la definición, por comparación homogénea, del plan de mejora propio en base a restricciones.

Con el fin de utilizar los resultados del estudio de forma eficiente, es importante identificar las principales diferencias entre los operadores del mercado (para el sector en estudio) con objeto de determinar los aspectos y áreas críticas que contribuirían a la definición y desarrollo de sistemas IDSS (Intelligent Decision Support System) y IPDSS (Intelligent and Predictive Decision Support System). El diseño de estos sistemas se revela como un área atractiva de futuras investigaciones en plantas automatizadas y con equipos complejos (iniciadas por la City University of Hong Kong). Estos sistemas ayudarían a mejorar los procesos de planificación y programación del mantenimiento, minorando los efectos del backlog y gestión de stocks, en la fase de operación.

En el Anexo I se indican las etapas básicas del proceso, con especial énfasis en la gestión del mantenimiento.

1. Fase de diseño conceptual: Etapa de Innovación (I). Arquitectura del sistema.

En esta fase es donde se define la configuración inicial del sistema. Se realizaría el análisis de necesidades, los requerimientos (a nivel operativo y de mantenimiento del sistema), y los estudios de viabilidad.

Para el caso de contratos integrados, puede suceder que parte del diseño venga condicionado por el cliente. En este caso, esta fase no comenzaría en C_1. Por tanto, las características del contrato establecerá el punto en el cual comenzaría el proceso.

Una nueva necesidad identificada, o una necesidad que ha cambiado o evolu - cionado durante el desarrollo del proyecto, introducirá un nuevo requerimiento al diseño del sistema. El alcance de las necesidades se puede contraer o expandir. Es muy importante que las componentes de valor, y de coste total del diseño, queden perfectamente estabilizados en la fase de diseño conceptual mediante el consenso entre las partes implicadas en la financiación, diseño, implantación y explotación.

La figura 59 muestra la estructura básica de las diferentes etapas para el diseño de STM+C:

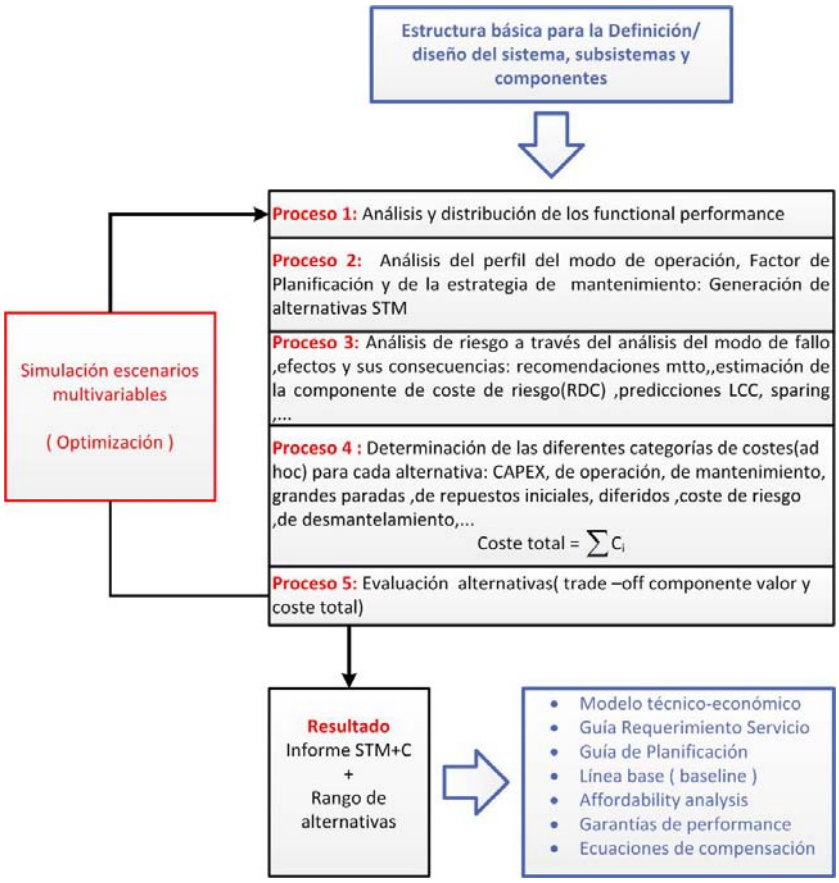


Figura 59: Estructura básica de las etapas para el diseño STM+C.

Las fases subsiguientes conforman la componente +D (Desarrollo) de la metodo - logía propuesta.

2. Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas (*Project Break Structure: PBS).*

El objetivo de esta fase es la definición del "genotipo técnico y económico" del sistema para estimar su capacidad (affordability analysis) y establecer la línea base ("baseline") para la comparación de alternativas.

En esta fase se dará respuesta, a través de un proceso de retroalimentación, a los Qué´s? que emergen de la fase anterior. Se define la configuración inicial a nivel de subsistemas y se consideran diferentes alternativas para los subsistemas con diferen - tes especificaciones técnicas, de operación y necesidades de mantenimiento (gama de

subsistemas). Su objetivo es la definición refinada de subsistemas en términos funcionales.

Para obtener la alternativa más deseable, y la gama de alternativas vinculadas con las que dar respuesta a los procesos de adaptación evolutivos inducidos por estímu - los internos y/o externos, se propone la simulación de escenarios multivariables.

Es preparatoria para la definición a nivel de componentes.

El modelo considera los objetivos e intereses del cliente (trade – off require - ments) para localizar la mejor solución más allá de lo estrictamente obligatorio. Para ello se propone la selección y definición de índices (ponderados o no) para la ordenación y priorización de alternativas.

En el diseño de la Solución Técnica y de Operación y el Mantenimiento (STM) se consideran, no sólo aspectos funcionales, sino también factores económicos y otros aspectos vinculados al problema de diseño (emplazamiento, restricciones a la subcontratación**,** restricciones legales y de mercado regulado**,** garantías, soporte logístico).

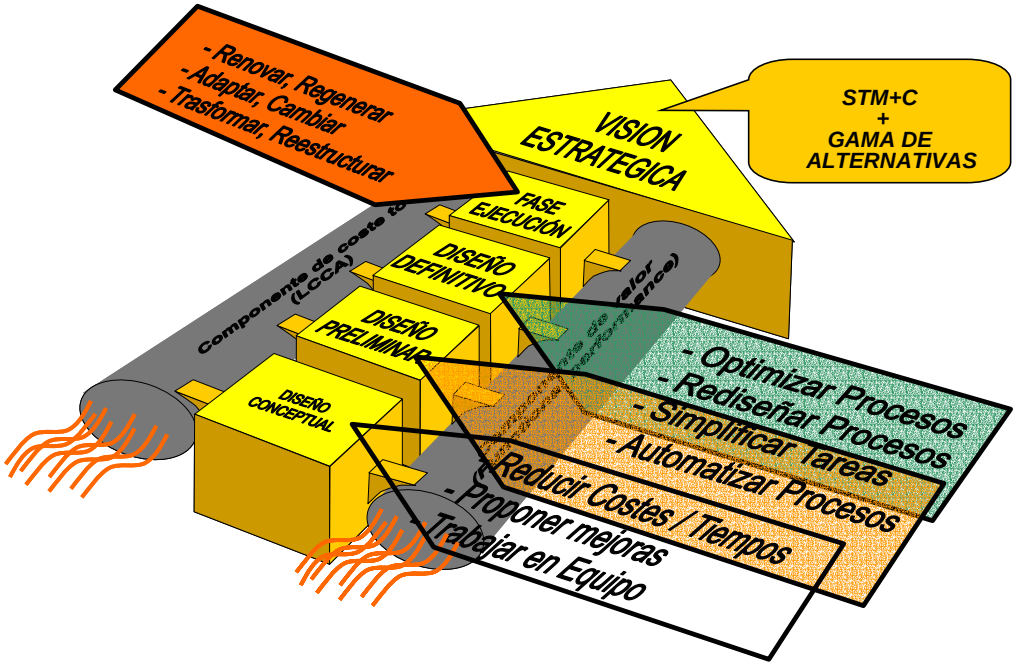


Figura 60: Definición equilibrada de la STM.

La decisión para la selección de una alternativa de diseño estará fundamentada sobre la "componente de valor" y la "componente de coste total" de las alternativas consideradas. La "componente de valor" vendrá representada por aquellos factores que, dependiendo de la naturaleza del sistema, el rango y alcance del estudio, se consideren claves para el funcionamiento (Especificaciones de funcionamiento – funtional performance): RAMS, constructabilidad, estabilidad, escalabilidad, impacto medioambiental, etc. La evaluación de esta componente, para cada alternativa, requiere la selección de los criterios para la selección de las "Especificaciones de funcionamiento", la determinación del peso de cada criterio, con respecto al resto de seleccionados, y la clasificación de las alternativas, en base a los criterios y los pesos asignados.

Los conceptos de RAMS y LCCA pueden ser usados, dentro del proceso de decisión en la fase de diseño, para realizar un trade-off entre el desempeño (com -

ponente de valor) y el coste total (componente de coste total) del sistema. RAMS y LCC son métodos utilizados para cuantificar el desempeño y diferentes categorías de costes, tales como coste inicial, coste de mantenimiento y coste de operación.

De acuerdo con la estructura básica (figura 59) para las diferentes etapas del diseño, se distinguen 11 pasos (figura 57):

P1: Análisis de requerimientos. Determinación de los criterios de evaluación y selección de las Especificaciones de funcionamiento ("functional performance").

El primer paso es el análisis, en función de las necesidades del cliente y la naturaleza del sistema en estudio, de los requerimientos de desempeño-performance del proyecto (KPIs). Los requerimientos identificados han de ser distribuidos a nivel de subsistema.

- *Reglas generales para la selección y definición de los P.I.´s.*

Es importante tener en cuenta, en este paso, las siguientes reglas, de carácter general, a la hora de seleccionar y definir las "Especificaciones de funcionamiento" (Maes, Pintelon y Van Wassenhove, 1989):

- *Sintonía (utilidad).* Los indicadores de funcionamiento deben estar en sintonía con los objetivos establecidos(a nivel estratégico, táctico y operativo). Su contribución para orientar el alcance de la meta debe estar clara.
- *Visibilidad.* Deben ser relevantes y transparentes con objeto de facilitar la identifi - cación de los síntomas.
- *Definición.* Esta fase es crítica. En el proceso de definición de los P.I.´s deben participar aquellas personas que están implicadas, de forma directa o indirecta, en la utilización e interpretación de los mismos. Mediante técnicas de trabajo en equipo se debe sugerir, analizar constructivamente y redefinir hasta conseguir el consenso sobre su utilidad. Solamente a través de una definición rigurosa del indicador se podrá medir lo que realmente se quiere medir. A veces, será preferible usar una definición que no es correcta al 100%, desde un punto de vista teórico, pero que ha sido usada durante años y es entendida y aceptada por todos los agentes implicados. El punto clave es alcanzar un acuerdo sobre el propósito del P.I. y su definición (una y sólo una) y asegurarse de que el dato es calculado correctamente.
- *Poder de control (nivel de influencia).* Los indicadores seleccionados deben informar de aquellas partes del sistema que estén bajo nuestra la influencia y control.
- *Cálculo.* El método de cálculo, así como el procedimiento de recogida de los datos, deben ser definidos con claridad y rigurosidad para cada P.I.. La definición debe permitir la validación de los datos de entrada (por ejemplo, dejar claro en qué punto/s del proceso el dato debe ser recogido, cómo debe ser interpretado, etc.).
- *Consistencia.* No deben ser influenciados por la inflación, las tasas de interés, otros.
- *Nivel de comparación.* Los P.I.´s tendrán, como misión principal, controlar las des - viaciones del rendimiento del funcionamiento y permitir establecer hipótesis sobre las posibles causas. Se comparará un mismo P.I. en diferentes periodos de tiempo (homogeneidad).

Una cuestión que a menudo se presenta a nivel de dirección es la necesidad de saber cómo lo están haciendo en comparación con la competencia. Existe la necesidad de disponer de una referencia (patrón) de medida que les permita evaluar su rendimiento/funcionamiento. Esta idea, aunque muy atractiva e interesante desde un punto de vista teórico, resulta poco realista desde un punto de vista práctico. Incluso adoptando las compañías de un mismo sector la misma definición para un determinado ratio, los factores propios que definen cada sistema (capacidad de

producción, antigüedad, tecnología) hacen que las cantidades no sean homogéneas, por lo que la utilidad de la comparación, como instrumento de gestión, es bastante limitada.

De igual modo, utilizar indicadores que se manejan en el sector, de forma mimética, sin una crítica de su utilidad en la contribución de los objetivos establecidos, puede resultar muy peligroso en la práctica.

- *Clusters de ratios.* Otro aspecto interesante es la definición de los"cluster de ratios interconectados"y la determinación de los rangos deseados para los valores de los ratios en esos cluster como fuente de información para:

(a) Búsqueda de óptimos globales a través de la valoración multicriterio de los efectos que las actuaciones sobre una variable tiene sobre determinadas variables del sistema.

(b) Equilibrado de actuaciones. La interrelación entre indicadores puede ser de utilidad para evaluar el efecto de determinadas propuestas para mejorar el diseño y balancear los efectos.

- *Nivel de agregación.* El exceso de agregación puede obscurecer la información y ocultar información útil.

P2: Análisis funcional y proceso de asignación. Diagramas de afinidad y Matrices de decisión.

En el segundo paso se seleccionan y definen los criterios para evaluar las alternativas y se determinan los requerimientos del cliente (trade-off requirements). Los criterios para la evaluación se extraen de los requerimientos de desempeño especificados por el cliente, a partir de los cuales, se desarrollan los "trade-off requirements" que serán usados para evaluar y clasificar/puntuar las diferentes alternativas. Los "requerimientos del cliente" (trade-off requirements) expresan las condiciones que hacen estar al cliente más satisfecho. Los criterios de evaluación podrían ser: fiabilidad, disponibilidad, downtime, coste inicial, costes de manteni - miento, costes de riesgos específicos, entre otros.

Otra componente importante también en el proceso de evaluación es la del coste total. Esta componente (en valor presente) puede ser dividida en diferentes catego - rías, tales como: coste inicial, coste de mantenimiento y costes diferidos vinculados a los riesgos durante el ciclo de vida del sistema. Para determinados sistemas (Plantas de energía nuclear, químicas) los costes de desmantelamiento o eliminación pueden representar una actividad bastante costosa, por lo que deben ser considerados en la fase de diseño.

Las técnicas propuestas para esta etapa crítica de la fase de diseño son los diagramas de afinidad, Matrices de decisión y técnicas de ayuda multicriterio a la decisión. La construcción de las matrices se realizará a través de la utilización de técnicas de trabajo en equipo aplicadas al equipo nuclear seleccionado al efecto (téc - nicas semicuantitativas).El objetivo es alcanzar el consenso entre las partes implica - das en la financiación, diseño, implantación y explotación.

P3: Gama de alternativas.

En este paso se identifican y evalúan diferentes configuraciones de diseño (alter - nativas).

P4: Análisis del factor humano (opcional).

Será necesaria la determinación previa del nivel de influencia (peso) del factor humano sobre el funcionamiento. Un análisis de este factor será útil cuando se

determine que la persona, o sus decisiones, son importantes en el funcionamiento del sistema, por ejemplo, mediante un análisis del "camino del fallo".

En el Anexo II se propone una guía básica del equipo de gestión para el área de mantenimiento y la descripción de sus funciones y responsabilidades para el éxito de la STM+C en la fase de operación (nivel 2). Esta guía sería de utilidad para la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planifi - cación"). Actuaría como documento de referencia para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

P5: Realización FTA. Análisis del sistema.

Se utilizará para mostrar los pasos específicos implicados en un fallo del sistema, reconociendo si son de índole mecánico o humano. Esta técnica será de utilidad para el modelizado y análisis de los mecanismos de fallo del sistema. Será necesario articular un proceso para la obtención de datos acerca de las "causa raíz" del fallo. Podría recurrirse a diferentes fuentes: consulta a proyectistas expertos, constructores especializados, bases de datos existentes, etc.

Mediante el uso de esta disciplina es posible recoger y caracterizar datos y luego tratarlos para generar información útil para los niveles 1 (diseño) y 2 (operación).
Para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones se proponen los siguientes esquemas (figura 61) para el análisis:

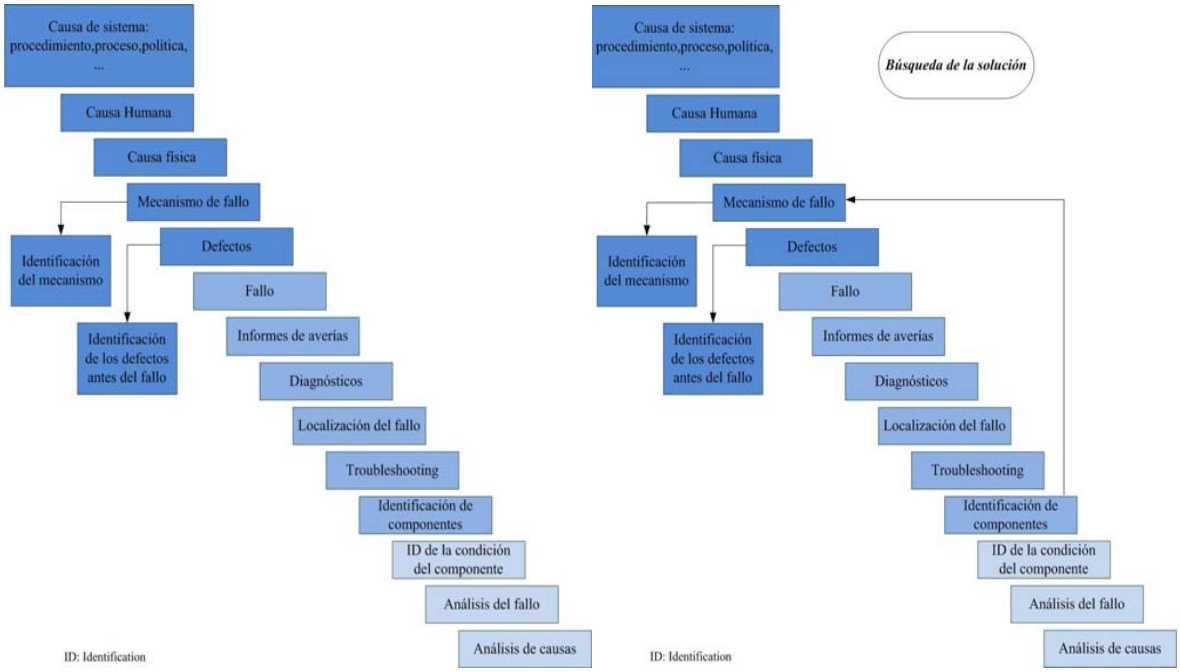


Figura 61: Esquemas para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones al diseño (adaptado de Daley, D.T., 2008).

P6: Realización FMECA de los subsistemas. Documentación de los modos de fallo.

Se propone esta técnica para la identificación, estudio de los efectos y conse - cuencias (sobre producción, medioambiente, seguridad) de los principales modos de fallo que pueden ocurrir durante la vida de los subsistemas (FMEA) y la prevención de problemas, especialmente los que se califiquen como críticos. El análisis de criticidad es posterior al FMEA. La combinación de ambos estudios es el FMECA.

El análisis de criticidad tendrá por objeto calificar cada modo de fallo de acuerdo a la influencia combinada de la severidad (consecuencia del fallo, si ocurre) y la ocurrencia (probabilidad o frecuencia del fallo). El riesgo de un modo de fallo y sus efectos se determinará por tres factores: la severidad, la ocurrencia y la probabilidad de detectarlo antes de que se produzca (detección); se evaluará a través del *RPN-teórico* y se expresará, en general, en términos de coste. Este valor será utilizado para calificar el nivel de criticidad.

La tabla 12 muestra la matriz propuesta para el análisis:

Tabla 12: Matriz de análisis de criticidad (adaptada de Schram, G., 2003).

Item o función	Modo de fallo	Efectos	Severidad (S)	Causas/ mecanismos potenciales	Ocurrencia (O)	Controles/ Métodos predictivos	Detección (D)	RPN (Teórico)	Coste	Recomen-daciones /Responsable

Los resultados serán de gran utilidad para:

- El diseño del sistema, de los procesos, la estrategia y plan de mantenimiento.
- Identificar los modos de fallo más probables, establecer un lenguaje común, obtener información sobre MTBF y el downtime, pérdidas de producción debidas al fallo, etc.
- Determinar las características físicas del fallo potencial, y por tanto, el/los parámetro/s de condición y las técnicas de medida para su monitorización.
- Determinar las tolerancias (Fronteras-boundary failure, desviaciones del set – point admisibles), los intervalos de monitorización, etc., para la planificación del co - rrectivo, preventivo; en general, para la planificación del mantenimiento.
- Tomar decisiones sobre recomendaciones en mantenimiento preventivo, so - porte logístico, política de stocks, documentación, predicciones de LCC, etc.

Los objetivos básicos son:

(a) identificar las limitaciones y debilidades de (algunos)subsistemas y definir la/s estrategia/s para su elevación (STM "libres de fallos") para el análisis coste-beneficio. Con la probabilidad de ocurrencia y los efectos – consecuencias de un modo de fallo, el nivel de riesgo para ese modo de fallo, el riesgo total y el coste del riesgo para una alternativa (RDC_i) puede ser calculado. La ocurrencia de un modo de fallo se supone diferente para cada alternativa.

(b) Adquirir una buena comprensión de la relación coste del riesgo (RDC_i) vs. coste de los recursos (Re*DC*), para cada alternativa.

P7: Análisis de seguridad.

Será realizado si la naturaleza del sistema, o las características del proyecto, lo requiere (transporte ferroviario, plantas nucleares-NPP, etc.). Su estudio y cálculo será realizado sobre la base del análisis de riesgos.

P8: Realización ETA. Desarrollo de escenarios posibles.

Este análisis es necesario para identificar los sucesos vinculados a fallos que estén recogidos en el contrato de mantenimiento. Ilustra las consecuencias del fallo de un componente o sistema. Los resultados serán utilizados para el proceso lógico de evaluación de probabilidades y plantear la Matriz de Evaluación para orientar la toma de decisiones acerca de:

- La estrategia y política de mantenimiento en base a los riesgos del modo de fallo.

- La estrategia y política de negociación de las condiciones del contrato de mantenimiento con el cliente.
- La formulación de las ecuaciones de compensación (penalizaciones y bonus).
- La gestión del ciclo de vida del sistema.

P9: Análisis del mantenimiento y de garantías.

Este paso es muy importante en el modelo. La función mantenimiento tiene una influencia importante en la gestión de riesgos, y por tanto, en la rentabilidad de la inversión. Los efectos de un análisis y diseño riguroso de esta función se traducen en una mejora de la disponibilidad, fiabilidad y operatividad de los equipos, una mayor seguridad, menor nivel de pérdidas de producción, menores efectos medioambientales, reducción de pérdida de calidad y costes de mantenimiento, entre otros.

Para lograr los objetivos anteriores y poder definir las garantías de desempeño (compromisos de resultados/retornos), será necesaria la combinación de varios factores:

- Una gestión y organización profesional y bien planificada de la función mantenimiento.
- Una correcta valoración y gestión de los riesgos principales.
- La implementación de las acciones de mejora con un enfoque holístico, combinada con los instrumentos de medida que permitan gestionar los principales riesgos de las instalaciones.

Como base para discutir los procesos de reducción del riesgo es importante tener en cuenta el Ciclo del Mantenimiento (modelo descriptivo que explica los procesos internos típicos de la organización del mantenimiento). En el se distinguen dos niveles:

- El ciclo estratégico, donde se establecen las directrices para la dirección y los procesos de medida para el control .
- El operativo, o de servicio.

En base al Ciclo de mantenimiento, las principales formas de reducir el riesgo serían:

- *Una reducción general,* a través de una práctica apropiada de la gestión del mantenimiento. Ello supone definir y diseñar la estructura de la función mantenimiento.
- *Una reducción específica,* a través de una apropiada gestión de los principales contribuyentes de riesgos. Las técnicas utilizadas serían las ya conocidas en los estudios de mejora en ingeniería: estudio de diseño, análisis de fallo, investigación del fallo, ingeniería del valor, etc. Esta última opción es la más activa por que, a pesar de que la existencia de una estructura de gestión es fundamental, el riesgo no desaparece por sí mismo si no existe una gestión dinámica de los principales contribuyentes. La situación ideal vendría dada por una combinación equilibrada de ambas opciones, tal y como se propone en el presente trabajo de tesis.

La complejidad de la función mantenimiento obliga, con objeto de brindar la máxima contribución a los objetivos del negocio, que su organización se diseñe sobre un enfoque holístico donde se contemplen todas las partes críticas al mismo tiempo.

- ***Análisis de riesgo y de garantías de desempeño. Trade-off niveles Especificaciones de funcionmaiento vs. coste total.***

El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incertidumbre de una decisión. En un entorno complejo y de alta competitividad, la toma de decisiones informada, en la fase de adquisición, es extremadamente impor -

tante debido a su impacto sobre los resultados económicos. Los efectos de adoptar una solución deficiente ("patologías de diseño") normalmente emergen en la fase de utilización, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.

Para que un problema de análisis de riesgo resulte manejable es fundamental definir claramente los objetivos, los cuales pueden especificarse en términos de disponibilidad, fiabilidad, seguridad (operacional, mediambiental), financieros, otros.

En esta etapa se abordan, básicamente, dos problemas:

I. Identificar y comprender, de forma pormenorizada, los riesgos/peligros poten - ciales asociados a una solución/decisión (Evaluación/valoración).

II. Conocer cómo gestionar las consecuencias asociadas a cada escenario probable (Gestión).

Por tanto, en este análisis es importante distinguir dos fases bien diferenciadas:

(a) La fase de Valoración /evaluación. Chequea el logro de los objetivos.

Se establece el perfil de riesgo (perfil de distribución probabilidad – consecuencia para una situación dada/escenario). En esta primera fase, lo que se busca es la identificación de los acontecimientos, casos y la construcción de las curvas de riesgos. La metodología más utilizada para el análisis cuantitativo del riesgo es la PARA (Probability Risk Assesment). Brinda la lista de escenarios de riesgos, inclu - yendo sus resultados y probabilidades. Suele estar soportada por técnicas como el análisis preliminar de riesgos, FMEA, análisis de criticidad, estudios de operatividad y riesgos, análisis de árbol de casos/sucesos, análisis de árbol de fallos. El siguiente paso es la determinación de las consecuencias asociadas a cada escenario.

Fundamentalmente, en esta primera fase, se ha de dar respuesta a las siguientes tres cuestiones:

- ¿Qué puede suceder?
- ¿Cúal es la probabilidad de que suceda?
- ¿Cúales son los efectos y consecuencias?

Los escenarios planteados serán función del contexto. Pueden incluir peligros no deseados (riesgos químicos, térmicos, mecánicos, eléctricos, radiactivos) u otro tipo de riesgos, como podrían ser: los financieros, reputacionales, de operación, entre otros.

(b) La fase de Gestión. Busca satisfacer los objetivos. En esta segunda fase se proponen las alternativas, se evalúan (para cada alternativa) las curvas de riesgo, se eligen las alternativas coste-efectivas para el control de riesgos y se definen los cursos de acciones correctivas. Es importante remarcar que las alternativas se definen en base a los siguientes criterios:

- Minimizar la probabilidad de ocurrencia.
- Reducir el impacto de las consecuencias.
- Transferir el riesgo (por ejemplo, vía póliza de seguro, contrato integrado).

Esta segunda fase se corresponde con la toma de decisiones en base a los trade-off entre los costes de las alternativas, los riesgos y las curvas de riesgos. A menudo, se toma una alternativa libre de riesgo (baseline) para realizar la evaluación de las alternativas.

La fase de valoración es una fase más técnica, formal, cuantitativa y objetiva, que la fase de gestión. Esta última, es más heurística, cualitativa y subjetiva, en base a criterios sociales y políticos.

El nivel de detalle del análisis se corresponderá, lógicamente, con la magnitud del riesgo a evaluar y los costes asociados a su gestión.

Varias son las técnicas o procesos que se pueden utilizar para identificar y valorar/evaluar los riesgos. Unas complementarias de otras en función de la naturaleza del sistema en estudio.

El plan de mantenimiento, para cada alternativa, se diseñará sobre la base de los resultados del FMECA obtenidos en P6.Con la información de los efectos asociados al modo de fallo de una alternativa, puede ser estimado el número de fallos y la cantidad de downtime esperada para un periodo de mantenimiento. Esta información permite el cálculo de la fiabilidad de la alternativa (i). La disponibilidad será calculada a partir del uptime y el downtime. El uptime puede ser calculado a partir del downtime y el tiempo total de operación.

En el Anexo III se recogen los estándares aplicables a los procesos de evaluación de riesgos y una guía básica para la planificación óptima de la función mantenimiento, en la fase de diseño, en base al análisis de riesgo.

- ***Análisis de las garantías de desempeño (performance) y ecuaciones de compensación.***

Se considera muy importante tener una definición consensuada y detallada de las garantías de desempeño y sus ecuaciones de compensación en la fase de concurso y adjudicación por su impacto sobre la componente de coste total de cada alternativa. En el modelo propuesto forman parte del proceso de decisión y de selección de la mejor alternativa.

En la Fase 3 (fase de diseño definitivo) es donde se definirán con la información de los efectos de los modos de fallo y sus consecuencias para una alternativa y una rigurosa comprensión de la relación coste de riesgo vs. coste recursos, para cada alternativa.

Para la selección rigurosa y fiable de una STM+C que garantice un nivel de rentabilidad y competitividad sostenible en el tiempo se considera fundamental traducir las garantías de desempeño en términos económicos.

Para el modelo propuesto, las “garantías de performance” son los niveles mínimos (niveles de corte) de las Especificaciones de funcionamiento (functional performance) que debe cumplir una STM para ser aceptada. Serán consensuadas por las “Partes”en el marco“ganar-ganar”. Por ejemplo, en el caso del sistema correspondiente al proyecto de un parque eólico (onshore) podrían venir definidas por los siguientes tres factores: “Disponibilidad Media garantizada (GMA)” para cada periodo de producción, “Curva de Potencia Garantizada (CPG)” y “Eficiencia del Parque/Proyecto (EP)”. En el caso del “subsistema pavimentación” de una autopista de peaje, podrían ser: la disponibilidad, la fiabilidad y las horas de downtime de un carril.

Su conversión/traslación a términos económicos será realizada a través de las denominadas “fórmulas de compensación”, en cuya expresión deberán aparecer como términos; pueden ser positivas (bonus) y negativas (penaltis); serán utilizadas para cuantificar económicamente los costes/beneficios diferidos de una STM.

Se considera el análisis de las garantías de desempeño (y la formulación de sus ecuaciones de compensación) muy importante, en las fases de concurso y adjudicación, para crear un incentivo económico en el contratista que le motive a mejorar los niveles de RAMS de la solución seleccionada y a reducir los efectos diferidos (económicos, accidentes, etc.) asociados a errores en el diseño o la toma de

decisiones en la Fase de Adquisición. Serán usadas para minimizar los impactos sobre el cliente/usuario de una solución y transferir los costes/beneficios de la misma al contratista o subcontratista. Ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo de toma de decisiones basado en el riesgo expuesto en este trabajo.

De forma destacada, las garantías de desempeño (y sus ecuaciones de compen - sación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa en:

(a) los sistemas técnicos complejos, intensivos en capital y de producción continua: NPP (plantas nucleares), parques eólicos, plantas químicas, infraestructuras públicas, plantas de fabricación ,etc.

(b) Los nuevos contratos integrados, tales como: D&C (Design & Construct), DBM (Design & Built & Maintain) y DBFM (Design, Build, Finance and Maintain).

Se pueden utilizar para un conjunto de fines de interés:

a. Como incentivo financiero para el contratista y subcontratista para mejorar los niveles requeridos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, seguridad, etc. (Es - pecificaciones de funcionamiento-functional performance).

b. Para la reducción de los efectos diferidos (económicos, accidentes) asociados a errores en el diseño, o la toma de decisiones, en la fase de adquisición.

c. Para la reducción de la repercusión de dichos efectos sobre el cliente/ciudadano.

d. Para iniciar un cambio cultural en aras a introducir un modelo que enfatice los procesos de decisión basados en el riesgo, las consecuencias y la sostenibilidad.

e. Buscar la mejor solución/servicio global.

Se considera que es una buena forma de cuantificar económicamente la efectividad total de un sistema y de imputar los costes diferidos a la parte responsable de los mismos.

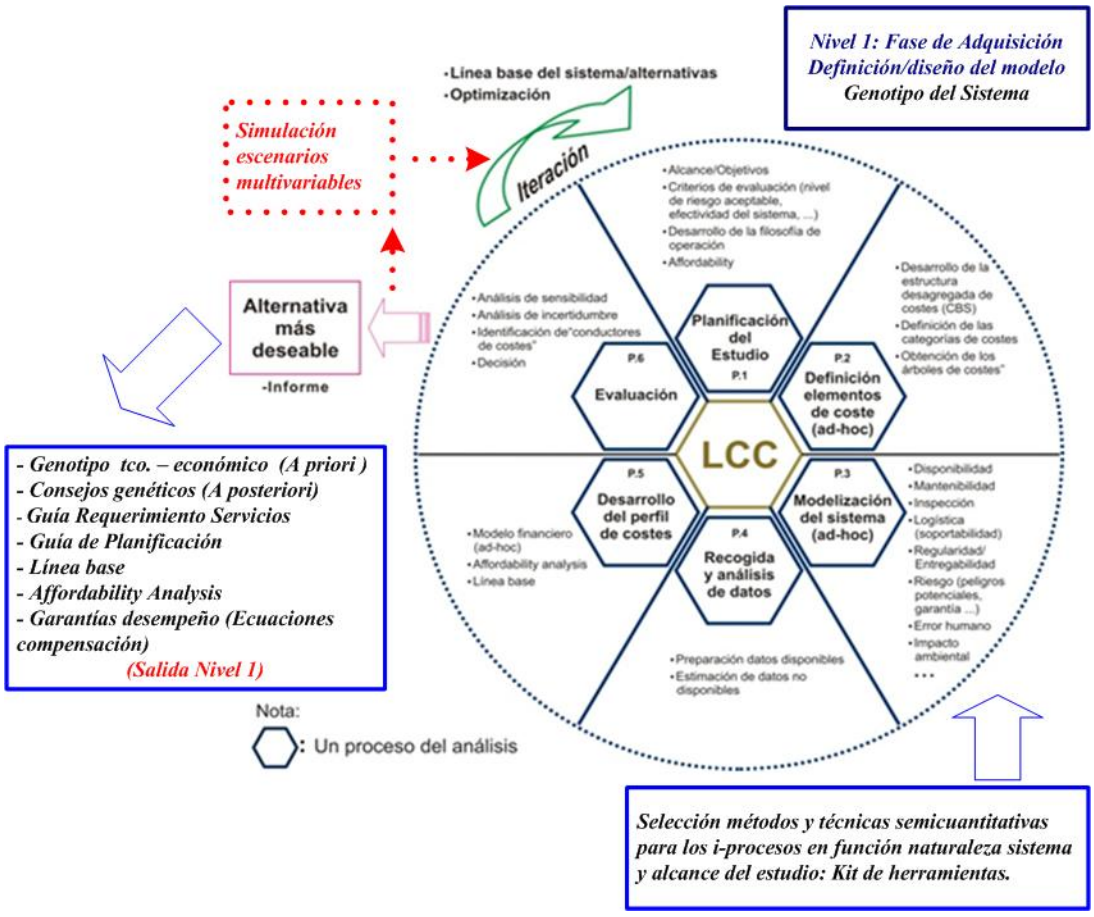
P10: Cálculo del LCC. Fases del análisis y mapa conceptual.

Un aspecto que refuerza el uso de la metodología LCC en el *Nivel 1*, es que a medio plazo, la demanda de producción sobre los activos aumenta, y con ello, el nivel de stress sobre los equipos de producción, lo que conduce a una caída de la disponibilidad realizada. Al mismo tiempo, la gestión del mantenimiento trata de aumentar la disponibilidad operacional con objeto de cumplir con las demandas de producción. La solución está en actuar sobre la *disponibilidad inherente (*etapa inicial del diseño).

Se consideran, habitualmente, seis procesos (Figura 62).

La búsqueda del equilibrio coste vs. beneficio en base al interés y objetivos del cliente justifica la aplicación y uso del LCCA, en base al análisis de riesgo, en el proceso de selección de alternativas (R-LCCA, en sus siglas en inglés).

Los procedimientos y el conjunto de técnicas para realizar el análisis dependerá de la naturaleza del sistema y el alcance del estudio (Figura 63).



(*) Affordability Analysis: *Análisis de lo "Posible" en cada momento (contextualización).*

Figura 62: Mapa Conceptual del modelo "LCC-dinámico" (Nivel 1)**.**

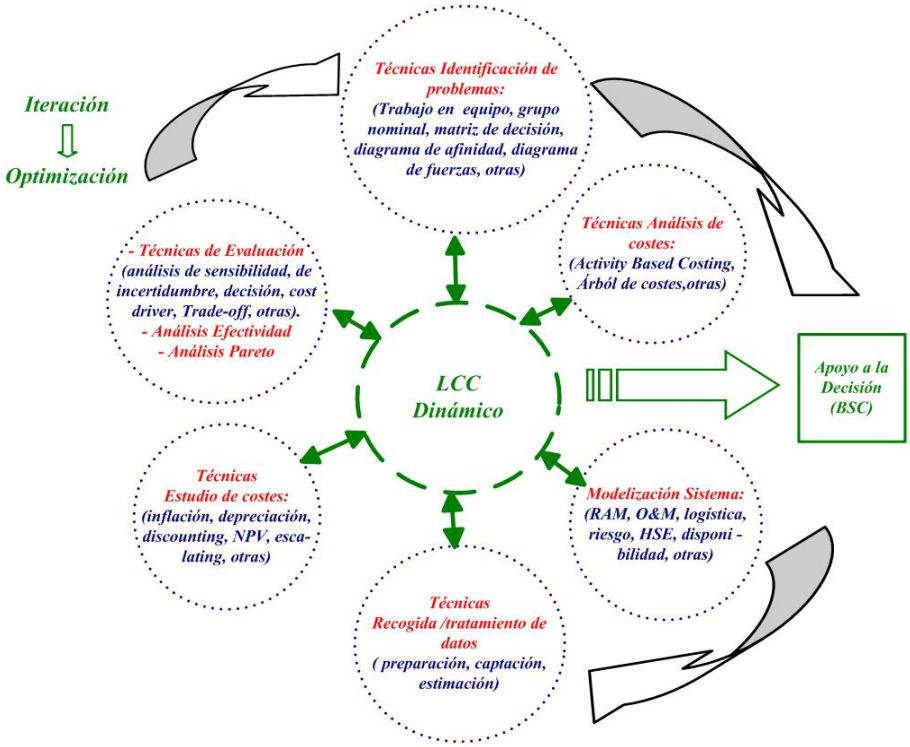


Figura 63: Técnicas semicuantitativas básicas del modelo (Nivel 1).

▪ *Elementos necesarios para el análisis.*

• *Proceso de modelizado del sistema.* En general, el sistema puede ser modelizado desde diferentes puntos de vista: disponibilidad, mantenibilidad, fiabilidad, logística, riesgo, error humano, etc. De forma especial, para las industrias de producción continua e intensivas en capital, la disponibilidad y la mantenibilidad representan los más relevantes "conductores de costes" en el análisis. Dado que el uptime de los equipos es clave en la estrategia de operación, la disponibilidad se convierte en uno de los principales objetivos de la gestión del mantenimiento.

• *Modelización de la disponibilidad.* Su definición y formulación dependerá de los elementos que se decidan incluir en el análisis del uptime y downtime. Por tanto, su modelización suele ser un problema complejo pues es necesario considerar muchos aspectos: distribución del fallo, del tiempo de reparación, mantenimiento preventivo, retrasos (en los suministros, en el mantenimiento, etc.). Consideraciones acerca de las diferentes formas de medir la disponibilidad son discutidas en Keeter, B. (2002).

Por todo lo anterior, existen diferentes formas de medir la disponibilidad. Ello exige la búsqueda de definiciones de consenso entre las partes, lo cual requerirá el uso de técnicas semicuantitativas. Habría que considerar los términos de disponibi - lidad inherente (considerada como parámetro de diseño del equipo: nivel 1); opera - cional (vinculada a la efectividad y eficiencia de las operaciones de mantenimiento); y contractual (a caballo entre la inherente y la operacional).

• *Los datos*. Es necesario una amplia variedad de datos (de fiabilidad, mantenibili - dad, de operación, costes, etc.). Es relativamente fácil encontrar fuentes disponibles al público que suministren datos de fiabilidad. Lo difícil es encontrarlas para los da - tos de operación y costes (datos sensibles).

• *La exactitud de los datos.* Es crucial para mejorar la certidumbre de la predicción y el diseño del sistema. Para recoger los datos previamente hay que definir, con precisión, los datos de entrada y sus requerimientos. Los cálculos estarán basados frecuentemente en costes de funcionamiento de equipos similares con historial de uso.

• *Establecimiento de una disciplina en la rutina de monitorización de los costes de funcionamiento de un activo.* Tres objetivos básicos:

- Contribuir a la gestión proactiva de mantenimiento y operación (Optimización del ROI de la inversión).
- Configurar una base de datos (de costes, parámetros técnicos, etc.) completa y descriptiva para dar soporte a futuros estudios y poder comparar costes proyecta - dos *(Nivel 1)* con costes reales en el *Nivel 2*.
- Mejorar la toma de decisiones a nivel de operación y mantenimiento.

• *Construcción de la Gráfica del Perfil de Costes* para el ciclo de vida total del sistema. Es un proceso esencial del análisis. Permitirá la evaluación, a nivel financie ro, de cada diseño con la referencia tomada como base (*baseline*).

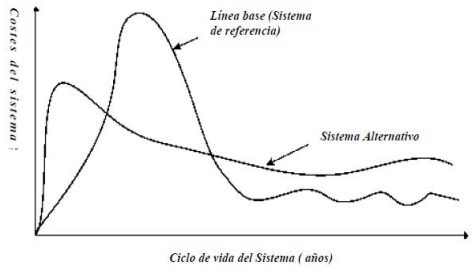


Figura 64: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo.

• *Enfoque multidisciplinar*.
• *Identificación de los conductores de costes que tienen impacto sobre el LCC total y sus relaciones causa - efecto.* Son claves para orientar las acciones de mejora coste efectivas y la generación de alternativas STM+C.
• *Timing*. Es importante decidir el mejor momento para realizar el análisis para cada programa en función del trade-off entre el perfil de costes proyectado y la curva de incertidumbre.
• *Proyección de los "Costes de Propiedad"*. Es necesario realizar un estudio exhaustivo para conocer los principios de funcionamiento del sistema, lo que permitirá identificar las categorías y la estructura de costes significativos con objeto de que el LCC cumpla con las funciones que se le exige.
• *Análisis de riesgo. PRA (Probabilistic Risk Assessment). Determinación del RPN-teórico.* El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incertidumbre de una decisión. Para que un problema de análisis de riesgo resulte manejable es fundamental definir claramente los objetivos, los cuales pueden especificarse en términos de disponibilidad, fiabilidad, seguridad (operacional, medioambiental, etc.), financieros, reputacionales, otros.
• *Proceso de optimización.* En un sentido amplio, buscar el conjunto de parámetros que minimicen el LCC del sistema total; en un sentido más estricto, la optimización puede ser aplicada a actividades específicas (optimización del diseño, del manteni - miento, de los repuestos, entre otras) que orientarán futuros proyectos de BPR, Reingeniería de organización o Reingeniería de procesos.
• *Optimización Evolutiva multiobjetivo. Ayuda Multicriterio a la Decisión.* Búsque - da de diseños óptimos y no solamente adecuados.

En el Anexo IV se da una visión del LCCA sin entrar en profundidad en los cálculos estadísticos y financieros que a menudo deben acompañar a este tipo de estudios.

▪ *Resultados del análisis: Matrices de decisión.*

Los resultados deben apoyar la toma de decisiones informada, tanto a priori como a posteriori, para:

- Evaluar y comparar alternativas de diseño: *Gama de alternativas.*
- Evaluar la viabilidad económica del proyecto/productos.
- Identificar los "conductores de costes e ingresos".
- Orientar las "acciones de mejora coste efectivo". En base al consenso de los agentes responsables de su cumplimiento, obtención de los ratios y los clusters de ratios ad-hoc para la gestión.
- Alinear objetivos a nivel estratégico, operativo y táctico.
- Evaluar y comparar alternativas de productos, de operación, test, inspeccio - nes, mantenimiento, mercados, etc.
- Evaluar y comparar diferentes enfoques para la renovación/rehabilitación/ ex- tensión de vida o eliminación de instalaciones.
- Los análisis de sensibilidad e incertidumbre del proceso de evaluación (P6) permitirán: estimar la Eficiencia del Proyecto (EP) para la STM+C seleccionada; el establecimiento de las tolerancias, y por tanto, los niveles de desviación admisibles para la consecución de los resultados ("Coeficientes de elasticidad"); el estableci - miento de los niveles de" alerta temprana" y los Planes de Actuación relacionados; determinar los grados de libertad admisibles para las variables de decisión sele -

ccionadas (definición de la gama de alternativas vinculadas); lanzar los escenarios para orientar los procesos de simulación.

- Planificación financiera a largo plazo.
- Implicar a operación y mantenimiento en la fase de adquisición.
- Generar una base de datos relevantes que oriente la toma de decisiones a futuro, etc.

P11: Elegir alternativa y sus gamas para los subsistemas. Proceso de priorización y ordenación: análisis de escalabilidad.

En términos generales (nivel macro), las alternativas se evaluarán en base a los cálculos de desempeño-performance y coste total. Es necesario un modelo que integre, en el proceso de toma de decisiones, las dimensiones críticas para priorizar y ordenar las alternativas con objeto de obtener el máximo ROI. Para equilibrar la componente de valor y coste total, se propone que la evaluación y priorización se establezca en base a tres índices básicos: índice de performance (PI), índice de ROI (IRoi) e índice de Presupuesto (BI). Estos índices se definirán en base a la naturaleza del sistema y los requerimientos del cliente (trade-off requirements). El IRoi considera la relación gasto en recursos (índice de inversión en función de los PI´s y su nivel objetivo) vs. coste de la dimensión riesgo. Se utiliza para medir el retorno de la inversión en términos de reducción de la dimensión riesgo (*RDC)*:

$$IRoi = \frac{Coste\ de\ indisponibilidad\ y\ daño\,(indirecto\ de\ mantenimiento)}{Coste\ de\ disponibilidad\,(directo\ de\ mantenimiento)} \qquad \textbf{(11)}$$

Las “penalizaciones y bonificaciones diferidas” se contemplarían en el numerador.

Los índices serán usados como indicadores para la tarea de priorización y el análisis de escalabilidad. Todos los sistemas, subsistemas y componentes serán evaluados y ordenados de acuerdo a los índices (tablas 13,14 y 15). La lista de subsistemas y componentes será usada para el diseño óptimo de la de la STM de acuerdo a las restricciones y las dinámicas consideradas (STM+C).

En base al Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M propuesto en el capítulo II (apartado 2), el proceso de priorización consta, básicamente, de las siguientes fases (figura 65):

(a) En base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contempladas (presupuesto, riesgo tolerable, otras) se definen las entradas principales al proceso: objetivos estratégicos (a nivel financiero, de producción), nivel de riesgo tolerable y presupuesto.

(b) Recopilación de datos de los subsistemas y sus componentes. En base al análisis de estos datos se adoptan decisiones estratégicas (determinación del nivel de criticidad, otras).

(c) Cálculo de los índices seleccionados para cada alternativa.

Es importante tener en cuenta, en este paso, las siguientes reglas, de carácter general, a la hora de seleccionar y definir los índices para evaluar y priorizar los sistemas, subsistemas y sus componentes:

- *Sintonía (utilidad).* Los índices deben estar en sintonía con los objetivos establecidos (a nivel estratégico, táctico y operativo). Su contribución para orientar el análisis, la evaluación y priorización debe estar clara.
- *Visibilidad.* Deben ser relevantes y transparentes con objeto de facilitar la identificación de la solución y la gama de alternativas.

- *Definición.* Esta fase es crítica. En el proceso de definición deben participar aquellas personas que están implicadas, de forma directa o indirecta, en la utilización e interpretación de los mismos. Mediante técnicas de trabajo en equipo se debe sugerir, analizar constructivamente y redefinir hasta conseguir el consenso sobre su utilidad a la hora de evaluar y priorizar alternativas. A veces, será preferible usar una definición que no es correcta al 100%, desde un punto de vista teórico, pero que es entendida y aceptada por todos los agentes implicados. El punto crítico es alcanzar un acuerdo sobre el propósito del índice y su definición (una y sólo una) y asegurarse de que el valor es calculado correctamente.
- *Poder de control (nivel de influencia).* Los índices seleccionados deben considerar aquellas partes del sistema que estén bajo nuestra la influencia y control**.**
- *Cálculo.* El método de cálculo así como el procedimiento de recogida de los datos deben ser definidos con claridad y rigurosidad para cada índice. La definición debe permitir la validación de los datos de entrada (por ejemplo, dejar claro el dato que debe ser recogido, como debe ser interpretado, etc.).
- *Consistencia.* Utilizar índices de forma mimética sin una crítica a su utilidad en la contribución de los objetivos establecidos puede resultar muy peligroso en la práctica. No deben ser influenciados por la inflación, las tasas de interés, etc.
- *Nivel de comparación.* Los índices tendrán como misión principal analizar las desviaciones entre las alternativas, permitir establecer hipótesis sobre las posibles causas y favorecer el análisis de escalabilidad. Se recomienda disponer de una referencia de medida (baseline) para evaluar el rendimiento sobre un patrón.
- *Clusters.* Otro aspecto interesante, es la definición de "cluster" y la determinación de los rangos tolerados en esos clusters, para:

• Búsqueda de óptimos globales a través de la valoración multicriterio de los efectos que las actuaciones sobre un elemento (componente, subsistema) tiene sobre el siste - ma.

• Equilibrado de actuaciones. La interrelación puede ser de utilidad para evaluar el efecto de determinadas propuestas para mejorar el diseño y equilibrar los efectos.

Para este proceso no es necesario un método "absolutamente matemático"; se puede utilizar un método semicuantitavo a la hora de asignar los *Rank* a cada índice.

(d) Evaluación y priorización de las alternativas en base a los índices seleccionados.

Son necesarios los tres índices para un modelo de decisión para la priorización de las alternativas que integre, mantenimiento y producción, con aspectos financieros relacionados con la priorización, en términos de ROI.

(e) Determinación de la alternativa y ordenación de la gama bajo las restricciones consideradas (STM +C + gama). Análisis de escalabilidad.

En el supuesto que no todos los componentes o subsistemas se puedan incorpo - rar debido a las restricciones establecidas, la incorporación para la definición y diseño de la solución, y la gama de alternativas, se realizará en base al nivel de prioridad establecido en función de los índices.

El objetivo será asegurar el máximo ROI en el ciclo de vida del sistema bajo las restricciones contempladas. Por tanto, la solución pasa por definir alternativas STM que presenten el mayor IRoi con objeto de garantizar el mejor ROI. Luego, la priorización de los subsistemas y componentes puede ser planteada como un problema de optimización.

Las condiciones de restricción no tienen por que ser absolutas ("restricciones dinámicas"); se pueden aumentar si se justifica con una importante reducción del riesgo y sus consecuencias. Para este propósito se consideran los índices *PI* y *BI*.

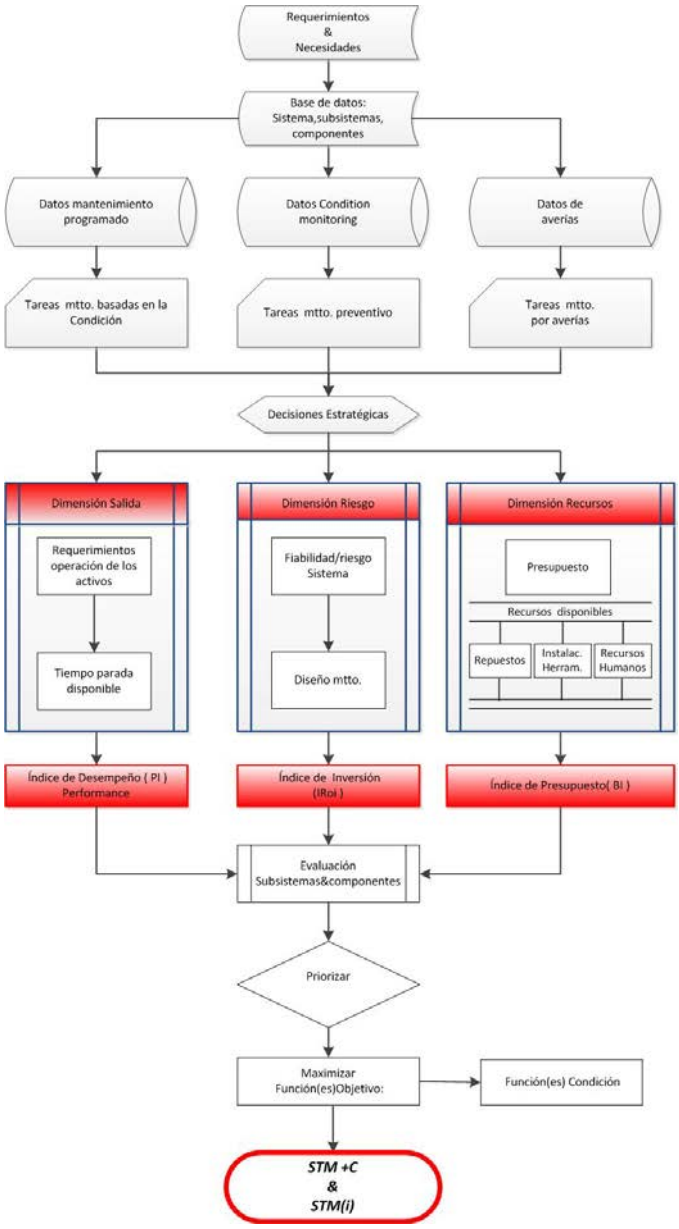


Figura 65: Marco conceptual para el análisis de escalabilidad. Evaluación y priorización de las STM (i) (adaptada de Tam, A.S.B. & Price,J.W.H.,2008)

La técnica permitirá la toma de decisiones informada, en la fase de diseño, en la definición y el diseño de la STM+C (y la ordenación de la gama de alternativas) en base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contempladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, otras).

Para el proceso de ordenación de los subsistemas se obtiene sus tres índices por suma de los valores de los índices asociados a cada componente (tablas 13 y 14). Es importante tener la información desagregada por componente y subsistema para hacer los análisis oportunos y poder definir los sistemas en base a diferentes

escenarios (peso diferente para cada índice; comparación en sólo dos dimensiones: Roi y BI; etc.). Con objeto de mostrar el mejor retorno en la reducción del riesgo de un sistema, se propone una ordenación desde el IRoi más alto al más bajo (más coste efectivos). Esto es, el de mayor IRoi se le asigna un 1 en la *columna de Rank*; el que le sigue un 2, y así sucesivamente. Se propone el criterio inverso para el BI (desde el más bajo al más alto) para reflejar los que suponen menor coste. Esto es, el de menor BI se le asigna un 1 en su *columna de rank*.

El valor medio *(AverageRank)* se calcula por suma simple, en el supuesto de que se considere el mismo peso para todos los índices; o de forma ponderada, en el caso contrario.

Un número de prioridad es asignado en función del *AverageRank.* El número 1 (más alta prioridad) corresponde al del menor valor de *AverageRank*, en el supuesto de que el criterio para el *PI* sea el mismo que el del *BI*. La más alta prioridad indica que el componente, susbsistema (o el sistema) es la de mayor IRoi y menor BI y PI.

En la tabla 15 se muestra una forma de ordenar y priorizar las alternativas para localizar la STM+C y definir y ordenar la gama vinculada en base a las restricciones establecidas (análisis de escalabilidad).

Tabla 13: Tabla tipo para el análisis y diseño de un subsistema.

Subsistema$_i$	***RDC***	**Re*DC***	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Comp$_i$1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Comp$_i$2											(*)	
Comp$_i$3											(*)	
...											(*)	
$\sum_k$												

Tabla 14: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un sistema.

Sistema$_i$	***RDC***	**Re*DC***	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Subsist1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Subsistem2											(*)	
Subsistem3											(*)	
...											(*)	

(*) $$Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \frac{Rank\,IRoi + Rank\,PI + Rank\,BI}{3}$$

Notaciones:

K: tarea número k del paquete de tareas de mantenimiento (MP).

MDT$_k$ (Maintenance Downtime para la tarea k): Tiempo requerido para la realización de la tarea k. Si se ejecutara dentro de un "mantenimiento oportunista", el tiempo asignado a esta tarea sería cero.

ODC (Output Dimension Cost): medida de las necesidades de producción y de los objetivos de prestación de servicios para operar un activo. La dimensión salida incluye las interrupciones planificadas requeridas para cumplir con los requerimientos de seguridad, calidad y normativos/legales. Se utiliza como base para definir el tiempo disponible para mantenimiento.

RDC (Risk Dimension Cost): Coste de los sucesos y eventos no planificados y no esperados. Se consideran las consecuencias, es decir, los costes diferidos (penalizaciones, multas,...) y las primas del seguro para cubrir eventos de baja probabilidad de ocurrencia. Se contemplarían, en general, los costes relacionados con la indisponibilidad y la corrección del daño por no mantenimiento. Base para estimar el ROI_M.

Re*DC (Resources Dimension Cost): Gastos de mantenimiento y soporte logístico.*

Tabla 15: Tabla tipo para el análisis de escalabilidad: ordenación y priorización de alternativas.

Sistemas	***Alternativas$_i$***	***RDC***	**Re*DC***	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
1	***S1***								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
2	***S2***											(*)	
3	***S3***											(*)	
4	***S4***											(*)	
12	***S1S2***												
13	***S1S3***												
14	***...***												
23	***...***												
24	***...***												
34	***...***												
123	***S1S2S3***												
124	***...***												
134	***...***												
234	***...***												
1234	***...***												

Para la resolución de problemas complejos se puede recurrir a la utilización de herramientas de programación dinámica.

Es muy importante una buena comprensión de la relación Re*DC* vs. *RDC* para obtener la relación coste vs. riesgo, para cada STM. Para conseguir este objetivo se propone utilizar conjuntamente:

- la tabla 15 para combinar diferentes sistemas que nos brinden diferentes alternativas, y
- el gráfico Re*DC*- RDC (figura 66) para seleccionar la mejor alternativa en base a los grados de libertad del sistema en cuanto a las restricciones.

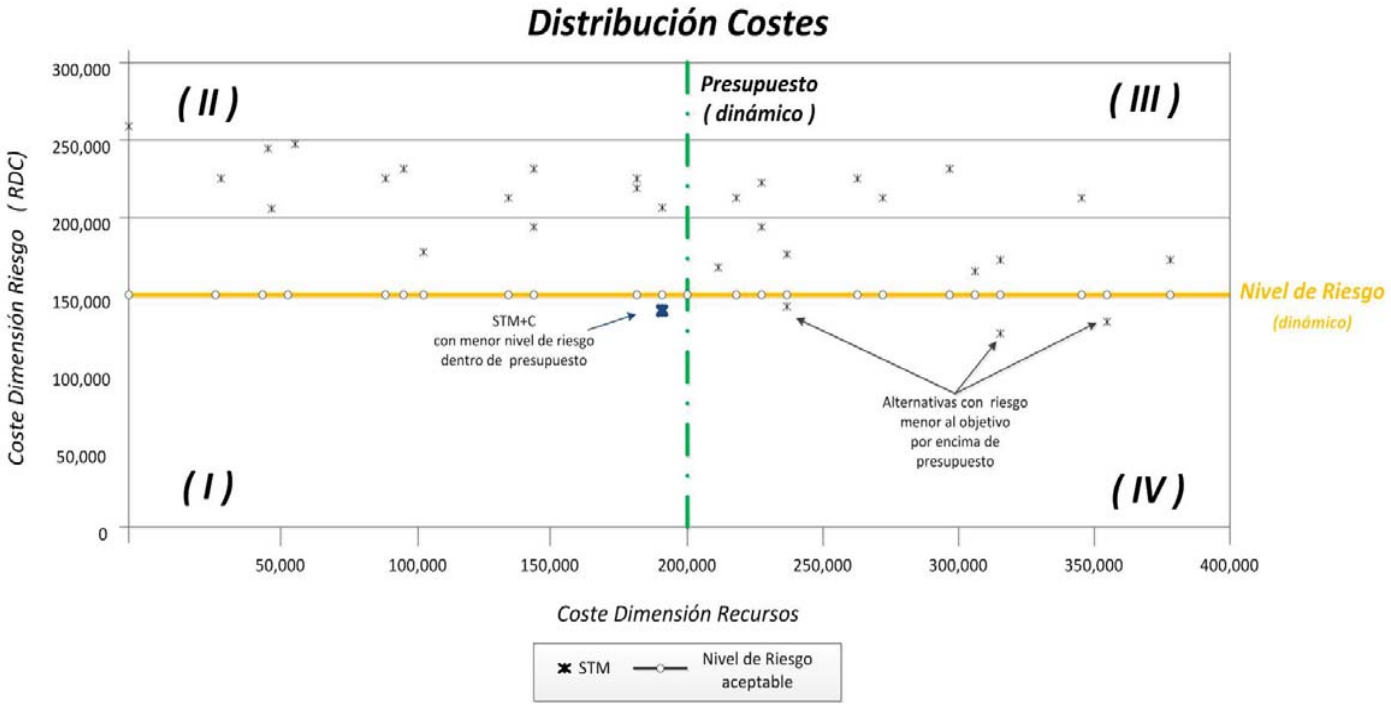
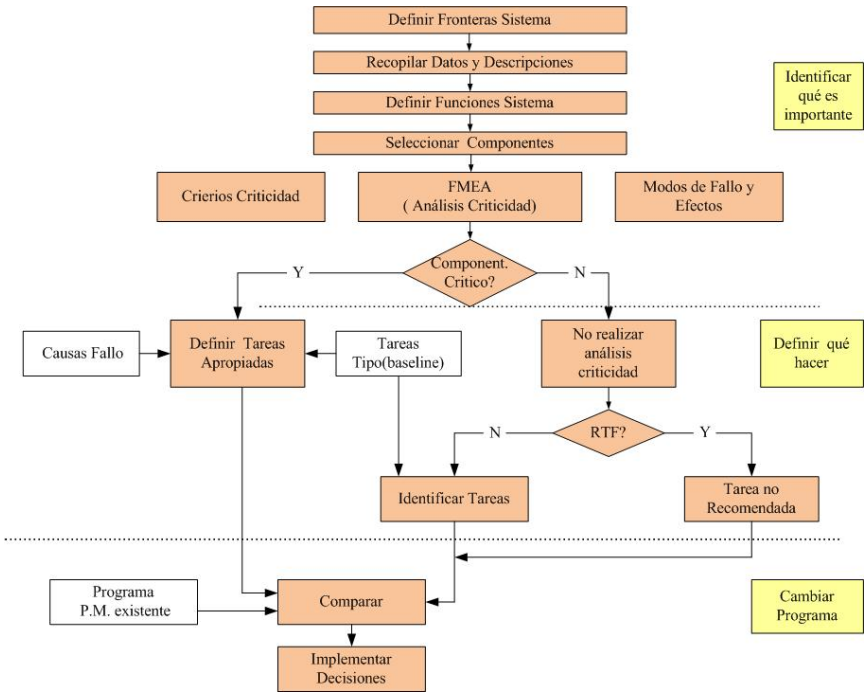


Figura 66: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar la mejor STM en base a los grados de libertad del sistema.

3. Fase de diseño Definitivo: Desarrollo y detalles de diseño.

En esta fase se ultiman los detalles de diseño de la STM+C. El análisis se realiza a nivel de componente (figura 67).



(*) RTF: Revision Task Force

Figura 67: Esquema conceptual para el análisis a nivel de componente (Barrat, M., 2004).

La figura 68 recoge la composición de los costes de cuatro alternativas diferentes de diseño presentadas sobre la base del LCCA. Muestra como una alternativa con más alto coste de adquisición (coste de construcción, en este caso) resulta más económica, a largo plazo, en términos de coste total de su ciclo de vida (Ingeniería concurrente).

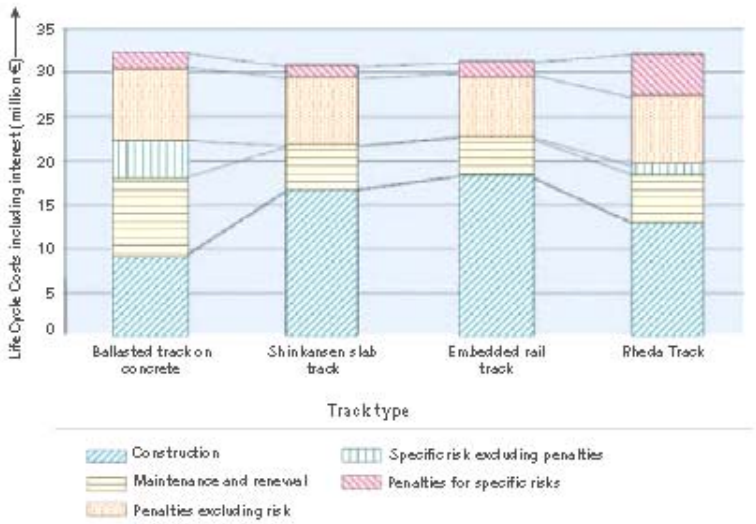


Figure 68: Cuatro alternativas de vía para el tren de alta velocidad HSL-Zuid (Zoeteman, A., & Braaksma, E., 2001). Composición del LCC (los datos de costes han sido alterados por motivos de confidencialidad).

Los costes relevantes suelen ser costes ocultos. Para descubrir "propiedades emergentes", sinergias, diferencias competitivas, inductores de ingresos y costes que contribuyan, tanto en la fase de diseño como de utilización del sistema, a la identificación de ventajas competitivas se propone el uso conjunto de las técnicas ABM y ABC.

4. Fase de ejecución. Puesta en marcha.

Es la fase de verificación. En ella se evalúa y "calibra" la configuración de la STM+C seleccionada. Su horizonte temporal es anterior a la denominada "Fecha de inicio" para cada sección (sistema, subsistema, componente), la cual comienza una vez emitido el Certificado de Aceptación Provisional. Los pasos básicos propuestos para esta fase se muestran en la figura 57.

La infraestructura de apoyo para el desarrollo de esta etapa y las bases propuestas para su despliegue quedan recogidas en las figuras 69 y 70:

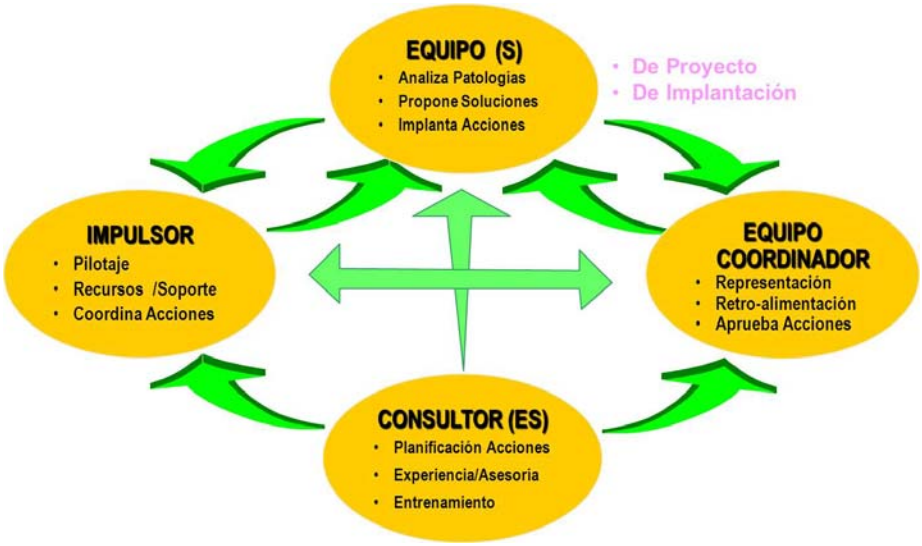


Figura 69: Infraestructura de apoyo.

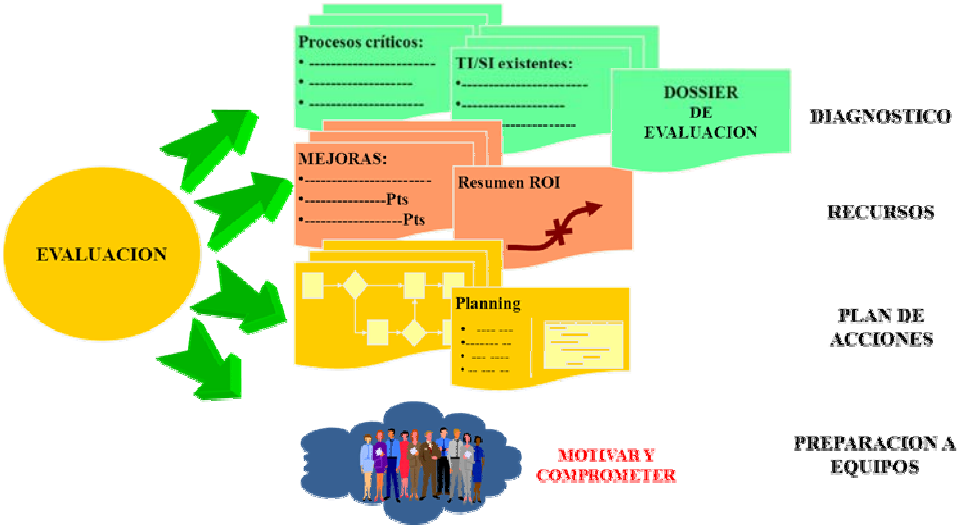


Figura 70: Bases para el despliegue.

La operativa propuesta para la puesta en marcha y calibración de la STM+C elegida, sería (figura 71):

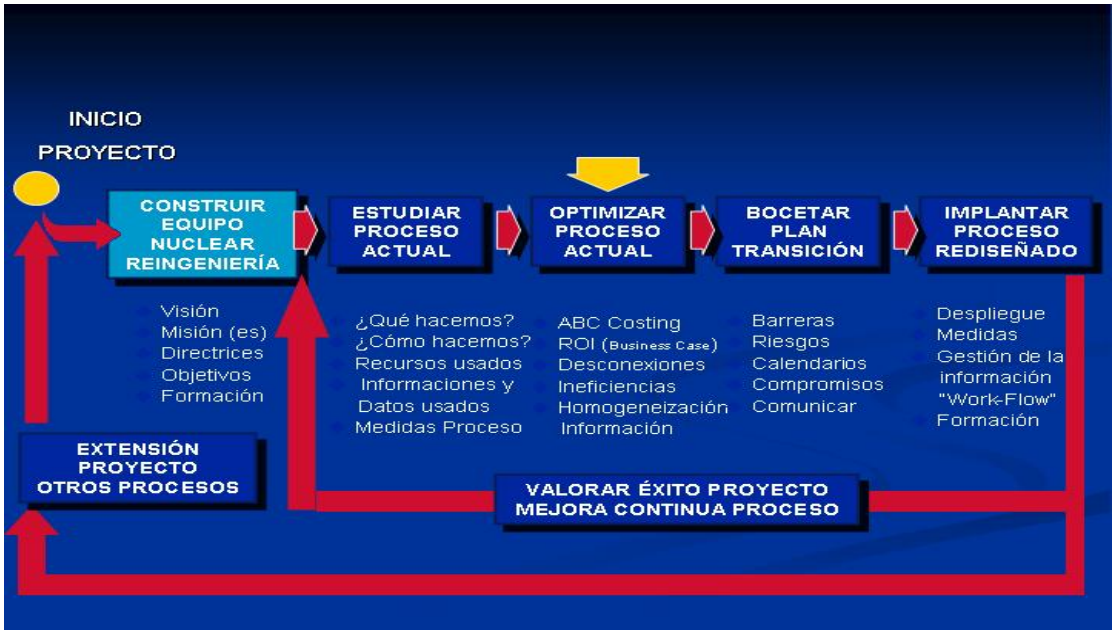


Figura 71: Operativa de implantación. Puesta en marcha de la STM+C.

El resultado es un informe muy detallado de alternativas coste - efectivas (STM+C - alternativas) el cual incluye características técnicas, de perfil de operación, mantenimiento y coste total, para cada alternativa.

Otros resultados posibles serían: la definición de la estrategia de negociación con el cliente en el perfeccionamiento del contrato en la fase de adjudicación; la definición rigurosa y realista de los elementos y condiciones claves en la redacción del contrato en la fase de concurso; la reducción del nivel de incertidumbre acerca del coste y los niveles de productividad del sistema en la fase de explotación; reducción de los efectos diferidos sobre el cliente asociados a errores en el diseño de la STM+C, o la toma de decisiones.

El modelo es de gran valor para el diseño, en la fase de adquisición, de alternativas STM+C de sistemas tecnológicos complejos y contratos integrados cuando los trade off han de ser realizados sobre la base del desempeño (performance) vs. coste total.

La definición funcional del sistema, subsistema y sus componentes será utilizada para apoyar (baseline) la definición y cuantificación de los recursos requeridos en el Nivel 2 (hardware, software, personal, datos, etc.).

3. CONTRIBUCIONES.

En un planteamiento orientado hacia el ciclo de vida del sistema (ingeniería concurrente), las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo. Para garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo se propone, como elementos claves del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C:

- *El análisis de las garantías de desempeño (performance), para cada alternativa.*

El objetivo es doble:

• comprometer/garantizar contractualmente las "condiciones de suministro / servicio posibles".

• evitar/reducir la repercusión de los errores de diseño y/o decisión sobre el cliente o usuario final.

- *La construcción de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonus).*

Para los sistemas técnicos de producción continua (plantas de producción de energía, gas, petróleo, parques eólicos, autopistas de peaje, etc.), y los nuevos contratos inte - grados, los "Costes diferidos de producción" hacen referencia a la penalización establecida en contrato por incumplimiento de las condiciones de suministro/servicio. Si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos, su impacto sobre el LCC puede llegar a ser muy importante. Luego, para este tipo de industrias, o similares, y para el nuevo contexto de contratación, es un término muy importante a tener en cuenta en el cálculo de la "componente de coste total" del ciclo de vida del sistema.

Por este motivo, es fundamental establecer un instrumento que permita la conversión, en términos económicos, del "coste diferido (penalización)", o "benefi - cio diferido (bonus)", para mejorar, en el proceso de selección de la mejor alternati - va en la fase de diseño, la precisión y exactitud de la componente de coste total.

- *El análisis de escalabilidad.* El objetivo es establecer una "ordenación/secuen - ciación" de la gama de alternativas posibles en base a las restricciones y las dinámicas consideradas (Soluciones dinámicas). Este análisis favorecerá, igualmente, la configuración de *alternativas STM - óptimas globales*, mediante el *"proceso de óptimos anidados"*.

- *El R-LLCA (basado en el análisis de riesgos).*

Otros dos hechos importantes en el proceso de comparación de la mejor alternativa con el modelo expuesto en este capítulo, son los "los datos perdidos (hidden data)" y las zonas de sombra ("shadow zone"), para las siguientes situa - ciones (figura 72):

1. El efecto de los bonus (compensación positiva) sobre el LCC total vs. proceso de decisión.
2. El efecto de las compensaciones (positiva y negativa) sobre el OPEX y los intervalos a considerar para los trade-off en el proceso de decisión.

Estas dos cuestiones quedan respondidas en el Caso 3 del capítulo V del presente trabajo de tesis.

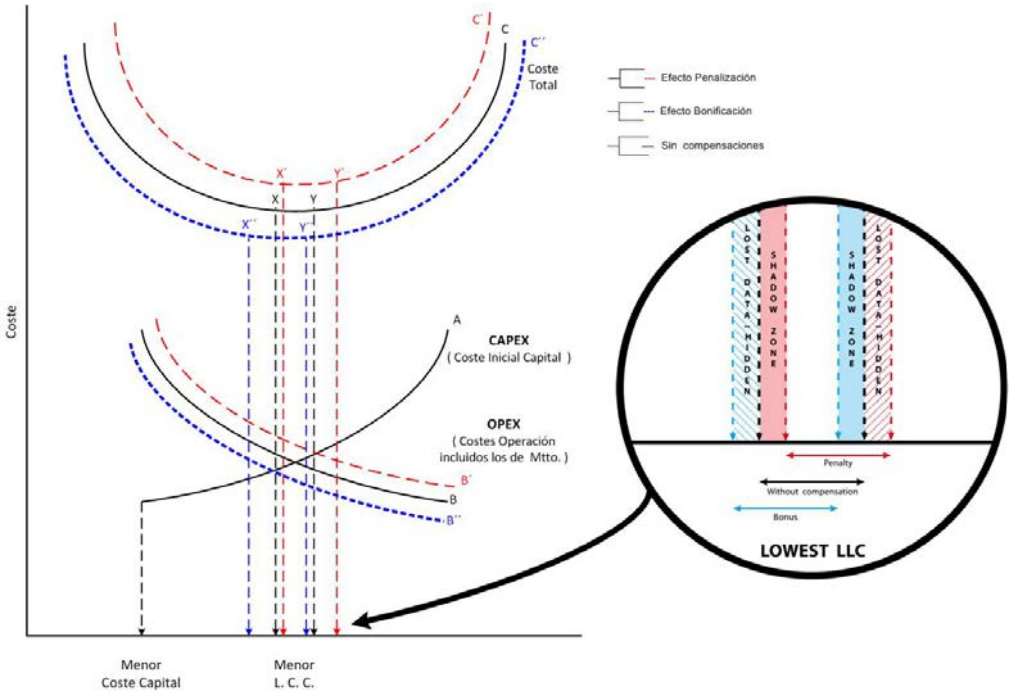


Figura 72: Efectos de las compensaciones (bonus y penalties) sobre el menor LCC vs. proceso decisión.

CAPÍTULO IV

PROCESO DE DECISIÓN Y PLATAFORMA CIENTÍFICO - TÉCNICA PARA EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE LA O&M.

SISTEMA DE INFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL CICLO DE VIDA DEL SISTEMA GLOBAL.

CAPÍTULO IV: PROCESO DE DECISIÓN Y PLATAFORMA CIENTÍFICO - TÉCNICA PARA EL CONTROL Y LA GESTIÓN DINÁMICA DE LA O&M.

1. INTRODUCCIÓN.

La dinámica actual de los mercados exige unos altos niveles de competitividad, para la cual, será necesaria una elevada capacidad de respuesta. Se propone un siste - ma de información para mejorar, de forma estructurada y base científica, el grado de competencia, en la fase de operación, de la STM+C seleccionada mediante la gestión de su configuración o, su reestructuración/rediseño ("nueva configuración adaptada"), para dar una respuesta, altamente optimizada, a estímulos externos y/o internos mediante equilibrio dinámico sistema-entorno (*"Homeostasis artificial del sistema"*).

Se propone una *Estructura de Control Dinámica* de apoyo a la toma de decisio - nes que permita la coevolución de los índices de desempeño-performance (IP´s) del sistema con los cambios asociados a factores tanto internos como externos (*cons - trucción del "fenotipo optimizado" del sistema).*

Entre las ventajas del modelo, cabe destacar:

• Su aplicación en la planificación, con un enfoque estratégico e integral, de la explotación y mantenimiento de equipos.

• Dar soporte a la toma de decisiones y, en su caso, optimizar la explotación de equipos bajo criterios de fiabilidad, disponibilidad, seguridad pública y medioam - biental, costes del ciclo de vida y criterios de explotación, plan de negocio de la empresa.

• Reducir los niveles de incertidumbre.

• Realimentar los resultados de la experiencia de explotación de la plataforma modular con objeto de mejorar el diseño de los diferentes equipos y sistema, en colaboración con el/los fabricante/s.

• Aumentar la confiabilidad del sistema y reducir los riesgos asociados a la operación.

2. MARCO DE REF ERENCIA PARA LA DEFINICIÓN Y DISEÑO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN.

2.1. La Gestión de activos en un entorno competitivo. Principios básicos.

Desde un punto de vista económico, los activos físicos se contemplan como capitales inmovilizados destinados a desempeñar una función productiva. Estos activos representan el inmovilizado material (*capitales inmovilizados*) de la empresa resultante de la transformación de capitales monetarios en capitales físicos.

Es tarea de la función mantenimiento (a nivel industrial) el reestablecer un equi - po de producción, o mantener este, en las condiciones de funcionamiento especifica - das. La política de mantenimiento elegida afectará al comportamiento al fallo, y por tanto, a la capacidad de producción disponible y los costes de operación.

Es en un entorno competitivo donde realmente se toma conciencia de que el Mantenimiento es importante en la producción, y que la aplicación de técnicas y métodos correctos de mantenimiento llevará a menores costes, mejores plazos de entrega, niveles de calidad más homogéneos y otras mejoras de interés.

El objetivo de cualquier estrategia de Mantenimiento debería estar encaminado a reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos.

El salto cualitativo que debe perseguir la función mantenimiento con objeto de dar respuesta a las exigencias continuas establecidas por las diferentes dinámicas del mercado es su evolución del actual enfoque basado en la intervención a uno nuevo centrado en la prevención.

Una de las líneas abiertas en la investigación relacionada con la gestión del mantenimiento es el desarrollo de técnicas de ayuda y apoyo en la toma de decisiones a los responsables de mantenimiento (planificador, ingeniero de manteni - miento y gerente). El objetivo, es brindar la posibilidad de realizar una gestión más científica (a nivel estratégico, táctico y operativo) que permita el "reemplazo" de decisiones soportadas por criterios subjetivos por decisiones más objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos, tales como: análisis de sistema y la construcción de modelos matemáticos. Este enfoque está bastante en sintonía con el propósito de la investigación en mantenimiento a nivel académico, donde se considera la necesidad de reducir juicios subjetivos por análisis cuantitativos.

2.2. El mantenimiento y la gestión del ciclo de vida. El binomio de la función mantenimiento.

(a) El mantenimiento como función gerencial. Rentabilidad del mantenimiento.

Desde un punto de vista económico, los activos productivos se contemplan como un medio para generar ingresos a través de la realización física de la idea de negocio.

Cualquiera que sea el modelo económico en el que se desarrolla una actividad, toda empresa debe orientar su estrategia a maximizar la rentabilidad de los capitales invertidos. Ahora bien, es importante tener en cuenta que maximizar la rentabilidad no significa hacer máximos los beneficios absolutos, sino maximizar la relación existente entre los recursos generados y los capitales invertidos en los activos productivos.

Como se recoge en cualquier libro de economía empresarial, la rentabilidad se define como el cociente entre los beneficios generados (utilidades) y los capitales in - vertidos para generar dichas utilidades.

Los beneficios pueden generarse a través de dos vías (figura 73):

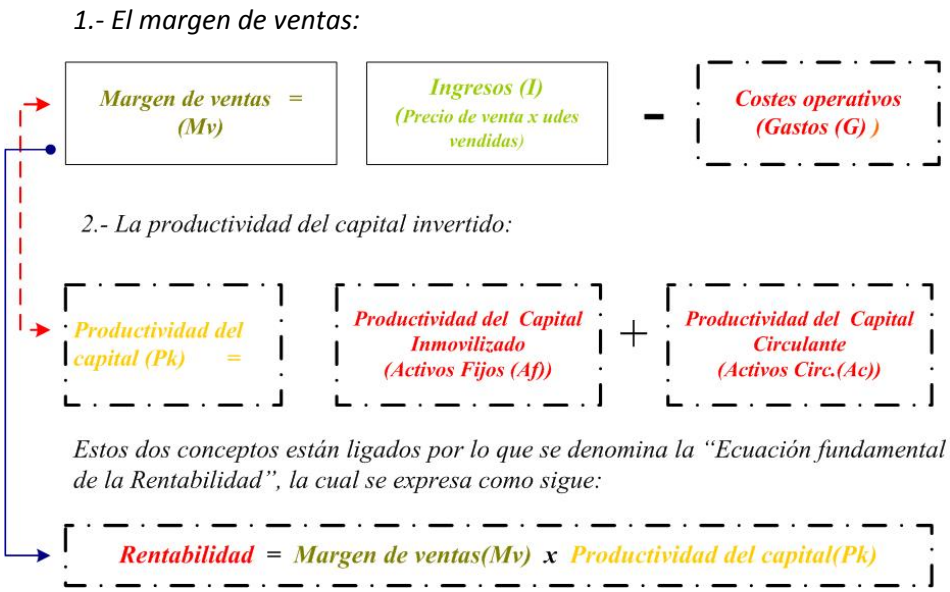


Figura 73: Las dos vías de generar beneficio.

El primer miembro de la ecuación representa la rentabilidad económica del capital inmovilizado. El segundo miembro, es el producto de dos factores: el primero relaciona el beneficio con las ventas; y el segundo, la cifra de ventas con el valor de los activos inmovilizados.

Es de sobra conocido que la rentabilidad económica de una empresa constituye un factor esencial para su salud financiera. Si la rentabilidad se mantiene en un nivel muy bajo, o se torna negativa durante un largo periodo de tiempo, la probabilidad de supervivencia de la inversión, en una economía de mercado es, seguramente, muy baja, por no decir nula. Por tanto, para garantizar la salud financiera de una empresa, es necesario mantener su rentabilidad económica en unos niveles aceptables. Para ello, es necesario actuar, simultáneamente, sobre el margen de ventas y sobre la productividad del capital, factores estos que no son independientes.

El *margen de ventas* se mejora (ver figura 73) aumentando los ingresos o reduciendo los gastos. La primera medida que se suele adoptar es actuar sobre la reducción del gasto. Sin embargo, esta medida debe ser racionalizada con objeto de que no afecte a la disponibilidad de las instalaciones o, la calidad del producto/servicio, de modo que genere un efecto negativo sobre el nivel de ingresos.

Por otra parte, si se tiene en cuenta que las partidas de mayor peso en los gastos de operación y mantenimiento son, generalmente, poco flexibles (dentro de las cuales destaca la incidencia de los recursos humanos propios), parece evidente que las actuaciones gerenciales para mejorar el margen de ventas quedan reducidas a un intervalo muy estrecho; sobre todo, cuando los precios de venta vienen impuestos por un marco administrativo regulador o condicionados por un mercado competitivo.

En conclusión, las posibilidades de mejorar el margen de ventas son muy limitadas. La manera más fácil, y generalmente más rápida de incrementar la rentabilidad de los capitales invertidos, es actuando sobre la productividad del capital inmovilizado en los activos físicos (instalaciones, equipos, edificios, etc.). El aprovechamiento eficaz de estos recursos exige que sean "gerenciados", operados y mantenidos eficientemente con objeto de que puedan realizar la función productiva con el mayor rendimiento y durante el más largo periodo de vida útil. En este contexto, es donde se inscribe el *"Mantenimiento como Función Gerencial"*.

La gestión del mantenimiento contribuye, de forma importante, a la eficiencia y efectividad de los procesos de producción a través de la eliminación y reducción de la frecuencia y severidad de los fallos en los equipos. Para aumentar el beneficio económico de un sistema técnico es necesario mejorar, de forma coste efectiva, la disponibilidad, la flexibilidad y operatividad de los equipos de producción. Para ello, es necesario contar: con una organización *"estilizada"* y bien estructurada de la *Función mantenimiento;* una acertada política y estrategia de gestión del mantenimiento; tecnologías actualizadas; y un sistema que brinde un servicio de mantenimiento fiable.

La calidad de los trabajos de mantenimiento afecta, no solamente, y de forma directa, al rendimiento técnico del sistema, sino que también contribuye a la realización de las operaciones y servicio al cliente de forma coste efectiva.

La tarea de investigación de las *"mejores prácticas"* facilita notablemente la definición de los factores críticos anteriores, y su gobernabilidad, tanto en la fase de diseño como en la posterior de operación.

La figura 74 muestra la conexión entre mantenimiento y rentabilidad:

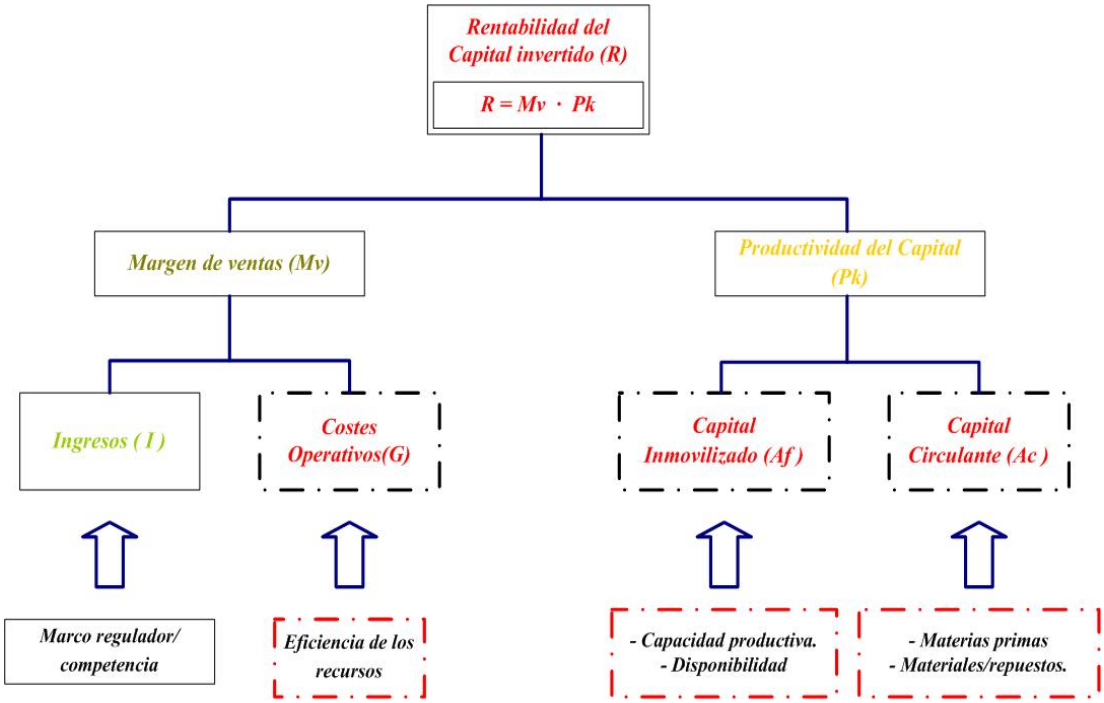


Figura 74: Árbol conceptual para evaluar el papel del mantenimiento en la rentabilidad.

La figura muestra que la gestión del mantenimiento tiene amplias posibilidades reales de contribuir a la rentabilidad del capital invertido mediante el desarrollo de tareas eficaces que mejoren la disponibilidad y fiabilidad de los activos fijos (equipos e instalaciones necesarios para las actividades productivas) y el activo circulante (ítems necesarios que dan soporte logístico a las actividades productivas, donde se encuadran los materiales y repuestos).

El mantenimiento industrial debe ser considerado un área de gestión económica que se verifica a través de las diversas acciones de orden técnico. Debe contribuir a mantener los costes dentro de los límites económicos para que la empresa pueda participar en los mercados con precios competitivos.

Las situaciones que generan indisponibilidad de las instalaciones productivas repercuten negativamente en la rentabilidad. Para un proceso productivo, no hay nada más ruinoso que la improductividad de los capitales invertidos en los activos fijos que sustentan las funciones esenciales del proceso.

Sin embargo, a nivel técnico, es muy poco frecuente encontrar instrumentos que permitan conectar las actuaciones de mantenimiento con la repercusión económica que estas actuaciones tienen sobre la rentabilidad de la empresa, y consecuentemente, sobre su cuenta de resultados.

(b) El mantenimiento como función técnica. Eficacia y eficiencia del manteni - miento. Orientación de las acciones.

Para orientar la gestión del mantenimiento es necesario utilizar otra terminología que, con el mismo contenido básico, obvie términos como rentabilidad, margen de ventas y algunos otros más próximos a los economistas que a los técnicos. Nos referimos a los conceptos de eficacia y eficiencia, directamente relacionados con la capacidad productiva, la fiabilidad de las instalaciones, la calidad del servicio y los costes.

Como se ha comentado, la forma de mejorar la rentabilidad de los activos fijos consiste en *maximizar la disponibilidad de las instalaciones en las condiciones óptimas de funcionamiento* (*uptime*) para soportar su *máxima capacidad productiva* (operaciones próximas a los parámetros de diseño de los equipos: velocidades, cargas, etc.). Por tanto, las actividades de mantenimiento deben estar orientadas a reducir al mínimo *la indisponibilidad (downtime), o la disponibilidad en condiciones no ópti - mas,* y a eliminar las perturbaciones ocasionales que, aunque sean breves, distorsio - nan la fiabilidad del proceso y la calidad del servicio.

La disponibilidad y la fiabilidad constituyen los dos, índices básicos que permi - ten medir *la eficacia del mantenimiento.* Sin embargo, el mantenimiento, además de eficaz debe ser eficiente, para lo cual es preciso que los costes incurridos sean lo más reducidos posibles. En este contexto, es importante hacer una consideración específica a la gestión de la disponibilidad y fiabilidad, por un lado; y por otro, al presupuesto y los gastos/costes de mantenimiento.

2.3. Efectividad total.

La gestión y las acciones de mantenimiento representan el campo donde hay que actuar con eficacia y eficiencia con el fin de mejorar la rentabilidad del capital inmovilizado.

La Efectividad Total (figura 75) de una empresa se considera como el producto de la efectividad (eficiencia) externa por la eficiencia interna:

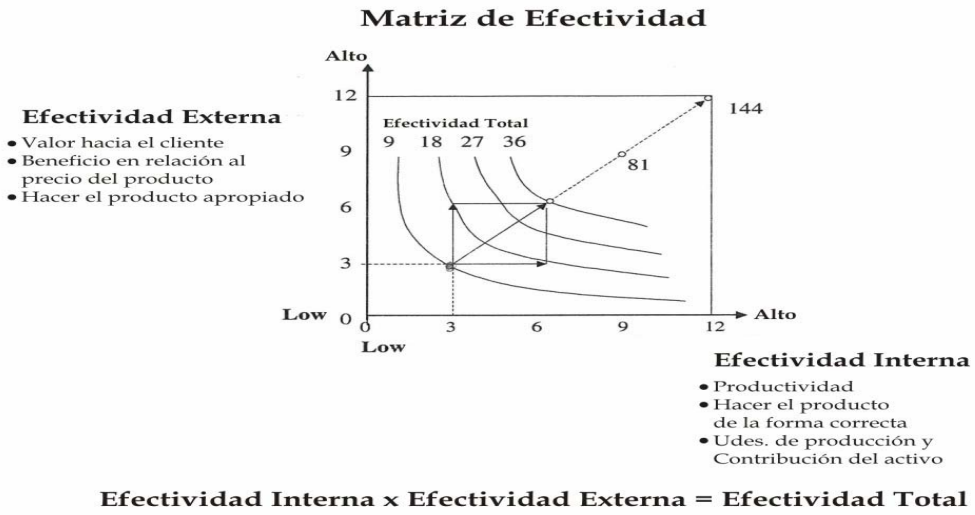


Figura 75: Resultado del efecto multiplicador del aumento simultáneo de la eficiencia interna y externa. (Ahlmann, H., 2002)

El gráfico muestra que se produce un efecto multiplicador sobre el resultado de la efectividad si en vez de actuar independientemente sobre una u otra variable se actúa conjuntamente sobre las dos.

- ***Ejes de actuación para la mejora de la efectividad total.***

La toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos de la empresa en un contexto globalizado, y altamente competitivo, como el actual. Es importante exami nar las diferentes situaciones de fabricación (productos vs. procesos) y las impuestas por el mercado (ciclos, competencia, regulaciones) desde el punto de vista de la

gestión del ciclo de vida y el mantenimiento para dar una respuesta efectiva y eficiente a la estrategia de gestión de operaciones (figuras 76 y 77):

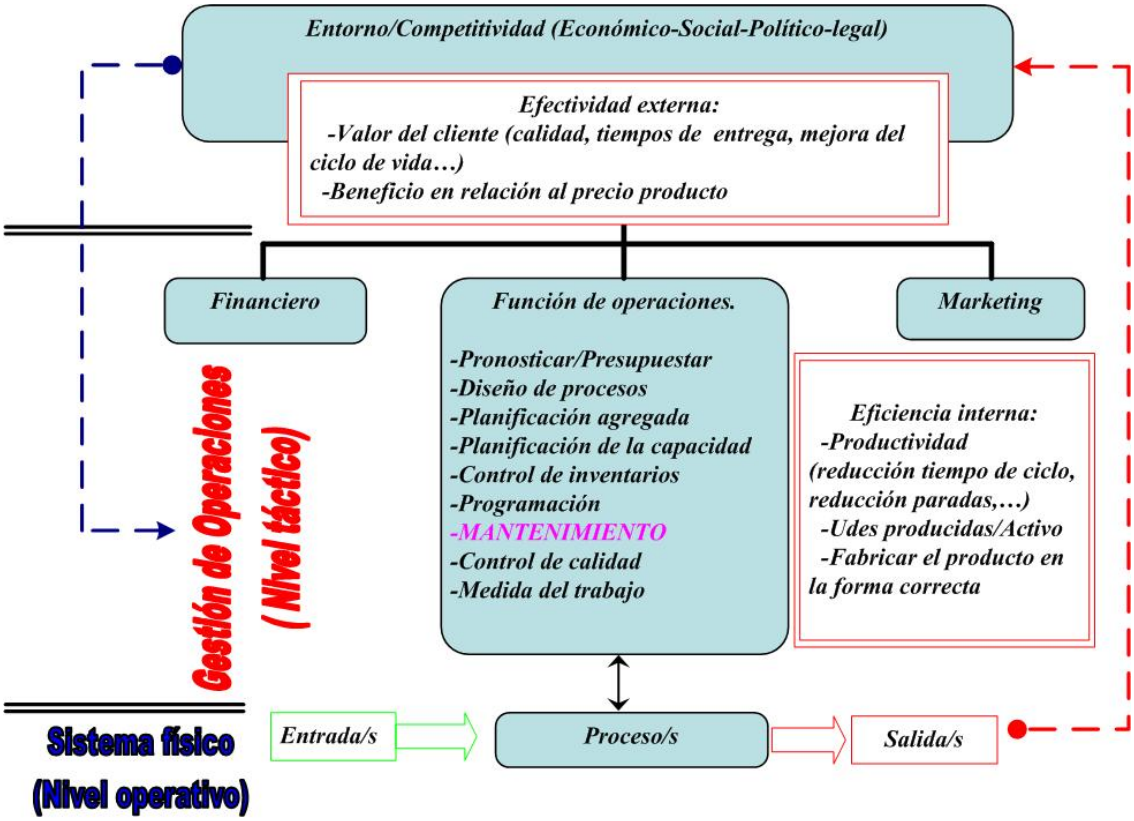


Figura 76: Ejes de actuación para mejorar la Efectividad Total.

El mantenimiento tiene una incidencia directa sobre los tiempos de producción, la disponibilidad y la estructura final de costes del producto/servicio.

Sobre todo en las industrias con procesos continuos (plantas de producción eléc - trica, químicas, de laminación, parque eólicos), y cada vez más, en empresas de pro - cesos discretos altamente automatizadas, el alto valor total de las instalaciones hace que las interrupciones del flujo productivo reviertan sobre los ritmos de amorti - zación de los equipos y los resultados económicos.

En las industrias de procesos discontinuos y de producción de series cortas, la creciente importancia de los tiempos totales de producción, es decir, de las tasas de rotación del material inmovilizado, hace que el factor tiempo tenga un efecto directo sobre la competitividad.

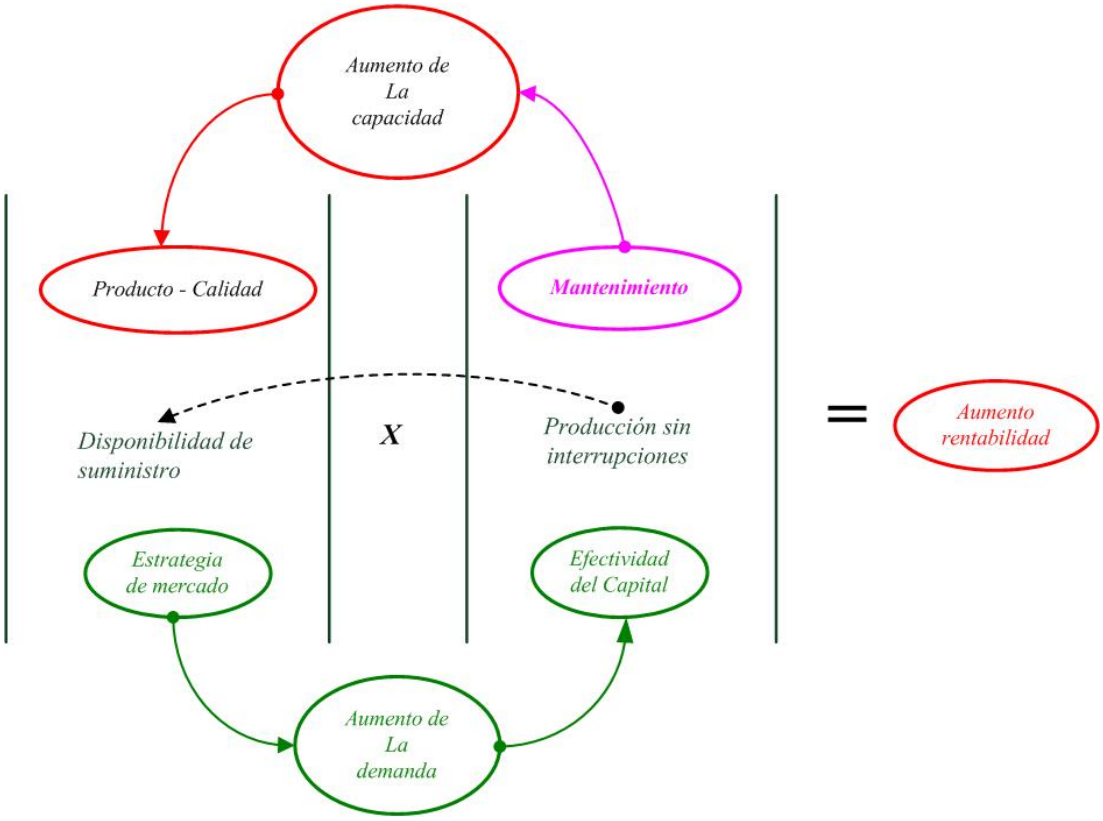


Figura 77: El mantenimiento como palanca de la Efectividad Total (Adaptado de Ahlmann, H., 2002).
Efectividad Total = Efectividad externa x Eficiencia interna.

2.4. Sistema complejo. Emergencia. Propiedades emergentes.

La *emergencia* o *surgimiento* hace referencia a aquellas propiedades (o procesos) de un *sistema* no reducibles a las propiedades o procesos de sus partes constituyen - tes. El concepto de emergencia se relaciona estrechamente con los conceptos de *autoorganización* y *supervivencia*; se define en oposición a los conceptos de *reduccionismo* y *dualismo*. El concepto ha adquirido renovada fuerza a raíz del auge de las ciencias de la complejidad (vida artificial, biología de sistemas, teoría del caos, etc.) y las simulaciones por ordenador de propiedades sistémicas. Para entender el concepto, es importante tener claro los siguientes términos:

- *Reduccionismo.* Se suele entender como reduccionismo, el enfoque metodológico del individualismo o atomismo, cuya tesis general afirma que los únicos objetos (conceptuales o reales, según el caso) que existen o interesan son los individuos, y que, lo que solemos llamar totalidades o sistemas, no son más que agregados de individuos sin estructura u organización propia.
- *Individuo*. Identifica a aquello que no se puede dividir. Un individuo es una uni - dad elemental de un sistema mayor o más complejo. Respecto de dicho sistema, no tiene sentido algo menor que un individuo. Por ejemplo, respecto de una sociedad humana, no tiene sentido algo menor que una persona.
- *Sociedad.* La *sociedad* es el conjunto de individuos que interaccionan entre sí y comparten ciertos rasgos culturales esenciales, cooperando para alcanzar metas comunes. El estudio del comportamiento social en animales (p.ej., en primates o en insectos eusociales, como algunas hormigas) lo realiza la Etología. El término sociedad es utilizado indistintamente para referirse a comunidades de animales

(hormigas, abejas, primates,...) y de seres humanos. La diferencia esencial existente entre las sociedades animales y las humanas es, más allá de su complejidad, la presencia de cultura como rasgo distintivo de toda sociedad humana.

- *Cultura.* Aunque usados a menudo como sinónimos, cultura y sociedad son con - ceptos distintos: la sociedad hace referencia a la agrupación de personas; mientras que la cultura, hace referencia a toda su producción y actividad transmitida de generación en generación a lo largo de la historia, incluyendo costumbres, lenguas, creencias y religiones, arte, ciencia, etc
- *Holismo.* El holismo enfatiza la importancia del todo, que es más grande que la suma de las partes (propiedad de *sinergia*), y da importancia a la interdependencia de éstas.

▪ ***John Stuart Mill: la distinción entre leyes homopáticas y heteropáticas.***

En su obra *A system of Logic* (1843), estableció la distinción entre leyes *homo - páticas* y *heteropáticas*:

- Las *leyes homopáticas* siguen el principio de *Composición de Causas*; este prin - cipio dicta que el efecto conjunto de varias causas es igual a la suma de sus efectos por separado.
- Las *leyes heteropáticas* no cumplen el principio de la Composición de Causas. El ejemplo paradigmático al que alude Mill es el de las *reacciones químicas*. En este campo, las propiedades del compuesto resultante no pueden formularse como la suma de las propiedades de los compuestos reactivos; por ejemplo: el agua tiene propiedades que no pueden reducirse a la suma de las propiedades del oxígeno y el hidrógeno.

Sería un alumno suyo, George Henry Lewis, quien, por primera vez, acuñaría el término *emergente* para referirse, precisamente, a los efectos heteropáticos. La distinción entre *propiedades últimas* y *propiedades derivadas* (de gran importancia en el debate posterior sobre la emergencia) también se la debemos a Mill. Las propiedades últimas son características de las sustancias elementales y no pueden derivarse de otras; por el contrario, las propiedades derivadas pueden, como su nombre indica, derivarse de las primeras.

▪ ***Autoorganización y emergencia: niveles micro y macro.***

Algunos autores consideran que los sistemas autoorganizados (como un tornado) son ejemplos paradigmáticos de fenómenos emergentes. Se distingue entre el *nivel micro* (compuesto en el caso del tornado por las moléculas de aire) y el *nivel macro* (constituido por el vórtice que forma el tornado). El emergentismo diferencia entre los *niveles micro y macro* en un proceso autoorganizado. Se considera que de las interacciones locales entre los componentes de una red (nivel micro) *emerge* una estructura o patrón global (nivel macro). Por ejemplo, un huracán puede considerarse un proceso emergente (el nivel micro está constituido por las moléculas de aire en movimiento y el nivel macro por el patrón en espiral que observamos).

En relación al reduccionismo, cabe destacar que gran parte de la literatura sobre la emergencia está relacionada con las *propiedades no - lineales* de los sistemas autoorganizados. En concreto, algunos tipos de redes, cuyos componentes interac - túan de forma no-lineal, resultan analíticamente intratables. Las ecuaciones diferen - ciales que rigen su comportamiento no se pueden resolver analíticamente y, calcular el cambio de una variable en el sistema, exige calcular el cambio simultáneo en las demás variables. Por tanto, cualquier transición de microestados requiere hacer referencia a todo el sistema, dando lugar a un holismo irreductible. Por este motivo,

los sistemas complejos no están sujetos a una reducción localizacionista (Bechtel y Richardson, 1993) y sus propiedades suelen considerarse emergentes. Las simula - ciones por ordenador (que hacen uso del cálculo numérico para realizar un estudio cualitativo del comportamiento) se utilizan para "naturalizar" estos sistemas y estudiarlos científicamente sin reducirlos a agregados de sus componentes.

- ***Novedad e impredecibilidad.***

Los fenómenos emergentes están, generalmente, asociados a la novedad o la sorpresa y a la impredecibilidad de su aparición, dado un estado previo. Sin embargo, para muchos autores (p.ej. Collier y Muller, 1999), la novedad o la impredecibilidad supone un criterio demasiado débil para la emergencia. Que algo sea novedoso o impredecible es una propiedad relacional entre el observador y el fenómeno observado (algo puede resultar novedoso la primera vez, pero absolutamente prede - cible después de familiarizarse con el fenómeno). Además, según se vaya estudiando la naturaleza de los procesos emergentes y se vayan clasificando, la impredecibili - dad, argumentan, dejará de ser un factor determinante de la noción de emergencia. Por otro lado, podemos entender la impredecibilidad a través de la teoría del caos determinista. En este caso, un sistema puede pasar por estados caóticos, pero también, por otros no caóticos y fácilmente predecibles, lo que haría que el mismo sistema fuera emergente y no-emergente, dependiendo del momento en que se encuentre. Por tanto, y en relación a la impredecibilidad, lo importante para una caracterización adecuada de la emergencia es la impredecibilidad *en principio* (es decir, independiente de la falta de conocimientos previos o de la falta de capacidad de cálculo del observador) y antes de que suceda por primera vez. (Stephan, 1999)

- ***Tipos de emergentismo.***

(a) Emergencia débil y fuerte.

El término emergencia se ha utilizado para describir fenómenos muy diversos que, en muchos casos, no pueden considerarse estrictamente emergentes (lo son sólo en apariencia o bien en relación a una teoría considerada incompleta). Para distinguir ambos tipos de fenómenos se han acuñado los términos de emergencia débil y emergencia fuerte:

- *Emergencia débil.* Se habla de emergencia débil cuando existen propiedades que son identificadas como emergentes por un observador externo pero que pueden explicarse a partir de las propiedades de los constituyentes primarios del sistema. Es el caso de la cristalización de las moléculas de agua: las cualidades del cristal no pertenecen ni al hidrógeno ni al oxígeno, pero pueden explicarse y predecirse a partir de ellos. En muchos casos, a los fenómenos de emergencia débil se los denomina *epifenómenos*, ya que se consideran una construcción lógica del observador que no tiene consecuencias causales en la realidad (por encima de las que pueden explicarse en relación a sus componentes). El ejemplo del tornado (mencionado anteriormente) sería considerado por muchos como un ejemplo de emergencia débil.
- *Emergencia fuerte.* La emergencia fuerte hace referencia a propiedades independientes de toda observación y con "poderes" causales propios. Se trata de propiedades intrínsecas al sistema y que actúan con los otros constituyentes del mismo de un modo original. La emergencia de la vida, a partir de lo inanimado, o de la mente, a partir del sistema nervioso, son los ejemplos clásicos de emergencia fuerte. Así, por ejemplo, se habla de causalidad descendente (*downward causation*, término acuñado por Donald Campbell en 1974) cuando las propiedades del nivel emergente tienen efectos causales sobre las propiedades o procesos de nivel inferior.

Campbell alude, para ilustrarlo, al caso de la selección natural: el organismo, como un todo (extendido en el tiempo en sucesivas generaciones), tiene un efecto causal sobre las moléculas de ADN, ya que es el organismo (el fenotipo como un todo) el que se selecciona causando un cambio en las frecuencias y disposiciones de sus componentes de micronivel (los nucleótidos de ADN en el genotipo).

(b) Emergencia epistemológica y ontológica.

El concepto de emergencia puede definirse en función de criterios ontológicos (relativos a la estructura de la realidad misma) o epistemológicos (relativos a la ca - pacidad del ser humano de conocer esa realidad).

- *Emergencia epistemológica.* Desde el punto de vista epistemológico, la emergencia hace referencia a la imposibilidad del observador de predecir el surgimiento de propiedades nuevas en el sistema que estudia. Cariani (1989, 1991) ha definido este tipo de emergencia como *emergencia en relación a un modelo*. Según esta concepción, dado un modelo del funcionamiento de un sistema, se dá un fenómeno emergente si para predecir su comportamiento adecuadamente es necesario introducir un nuevo elemento o propiedad en el modelo (que no sea la mera combinación de sus elementos anteriores).
- *Emergencia ontológica.* El emergentismo ontológico contempla el problema desde la perspectiva de las propiedades intrínsecas del sistema, independiente de su relación epistémica con un sujeto. Según esta concepción, el mundo físico está constituido por estructuras físicas, simples o compuestas, pero estas últimas no son siempre meros agregados de las simples. Los distintos niveles organizativos tienen una autonomía, tanto esencial como causal, que requerirá tanto conceptos como leyes distintas.

Muchos autores consideran que la emergencia epistemológica es un tipo de emergencia débil, ya que depende de las capacidades predictivas del observador. Sin embargo, el problema radica en la imposibilidad de decir algo sobre la realidad si no es presuponiendo un aparato teórico y la dificultad de distinguir, en última instancia, entre qué propiedades son epistemológicas y cuáles ontológicas.

(c) Emergencia sincrónica.

Desde el punto de vista *sincrónico*, la emergencia se define en el contexto de las relaciones entre los niveles micro y macro de un sistema. Desde esta perspectiva, la emergencia se identifica con la *irreducibilidad conceptual*: las propiedades y leyes emergentes son rasgos sistémicos de sistemas complejos gobernadas por leyes irreducibles a las de la física por razones conceptuales (tales patrones macroscópicos no pueden ser aprehendidos por los conceptos y la dinámica de la física). Este es el tipo de emergencia definido por Paul Teller y Andy Clark. Para Paul Teller (1992), una propiedad es emergente *si y sólo si* no es explícitamente definible en términos de las propiedades no relacionales de cualquiera de las partes del objeto en cuestión. Andy Clark (1996) sugiere que un fenómeno es emergente sólo en el caso de que sea mejor comprendido atendiendo a los valores cambiantes de una variable colectiva. Una variable colectiva es aquella que dibuja el patrón resultante de las interacciones entre múltiples elementos de un sistema (en teoría de sistemas dinámicos, la variable colectiva es también llamada parámetro de control). Cuando la variable colectiva incluye elementos tanto internos como externos al sistema, estamos ante un fenómeno de *emergencia interactiva.* (Hendrick-Jansen, 1996)

2.5. Integración del mantenimiento en los objetivos del negocio.

Los efectos de un bajo nivel de rendimiento en los objetivos de la Función mantenimiento se traducirán en una baja rentabilidad del sistema. La Gestión del Mantenimiento debe proporcionar un equilibrio sutil entre el nivel de mantenimiento a ser realizado y los objetivos del negocio. Para ello, es necesario brindar informa - ción que permita a los gestores del mantenimiento identificar los puntos relevantes para alcanzar el equilibrio. En general, la función mantenimiento necesita optimizar los niveles de prevención aplicables con objeto de optimizar la capacidad de producción disponible que contribuya a los beneficios de la compañía.

Para obtener el máximo retorno de la inversión y mantener los máximos niveles de productividad, es necesario un Modelo de Gestión de Activos que:

1.- traduzca, de forma efectiva, la información de los activos en conocimiento relevante y oportuno para la "toma informada de decisiones".

2.- Posibilite la planificación y control sistemático de un activo a lo largo de su ciclo de vida. Incluye su especificación, diseño y construcción, operación, mantenimiento, modificación y eliminación.

3.- Favorezca una gestión proactiva alineada con la misión, visión y objetivos de la compañía, lo que implica un enfoque amplio que integre todas las partes de la organización: Mantenimiento e ingeniería, producción/operación, calidad, compras, etc.

La figura 78 muestra las componentes del plan director propuesto para la definición y diseño de la plataforma científico-técnica del sistema de información:

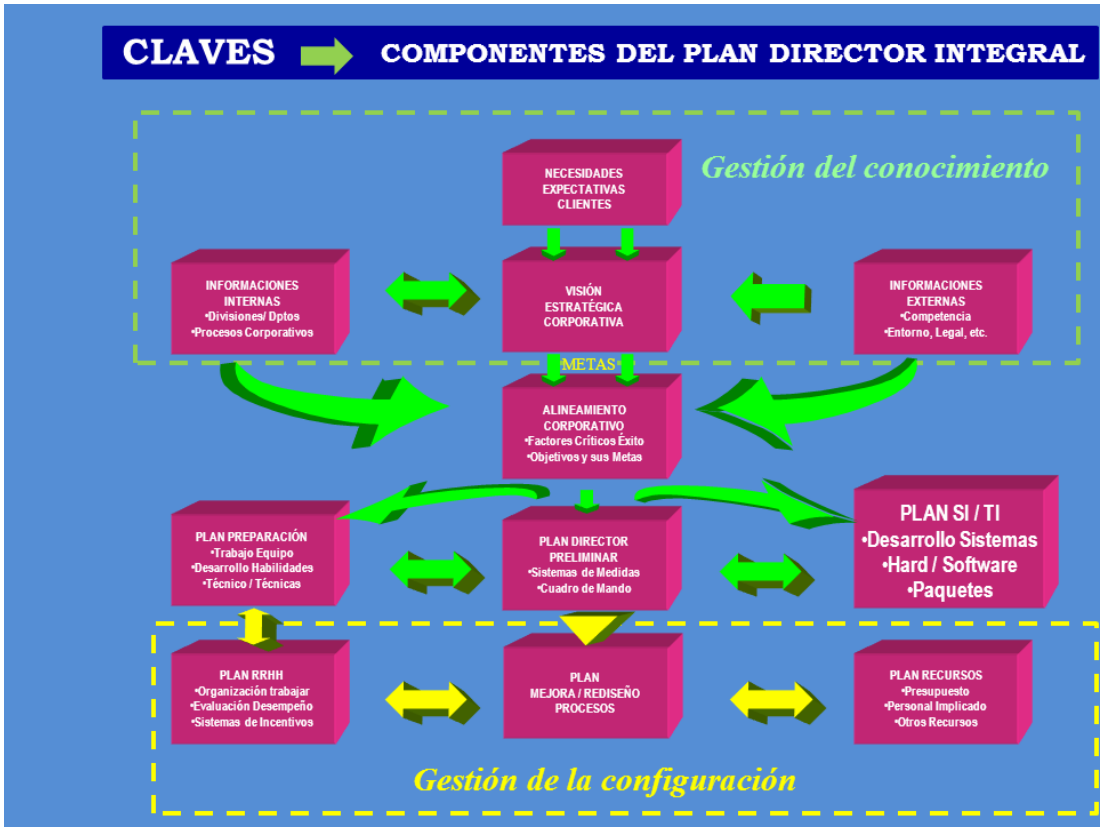


Figura 78: Componentes del plan director propuesto para el desarrollo de la plataforma científico – técnica.

3. DEFINICIÓN DE LA PLATAFORMA CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN.

En la gestión del ciclo de vida de un sistema, nos encontramos frecuentemente con situaciones en las que la información no está inmediatamente disponible, sino que ha de deducirse de los *"datos requeridos"* (1). Ello indica que el *proceso de deducción* no es algo externo al sistema de información, y que, para muchos tipos de información, el *proceso de decisión*, en sí, debe ser parte integral del sistema de información. En base al anterior razonamiento, y reconociendo los sistemas que hay disponibles actualmente, Goldratt, E.M. llama *"sistemas de datos"* a los sistemas que proporcionan información inmediatamente disponible, reservando el nombre de *"sistemas de información"*, para aquellos que proporcionan información que no se puede obtener si no es a través de un proceso de decisión. Sin un modelo de decisión adecuado no es posible deducir de los datos la información necesaria. (Goldratt, E.M, 1990)

Al analizar diferentes situaciones típicas de la gestión del ciclo de vida de un activo, o conjunto de estos, se observa que la información tiene una estructura jerárquica: lo que para un nivel es un dato requerido, puede ser información para otro nivel. Luego, para que un sistema de información sea completo, debe construirse sobre una estructura jerárquica. Un sistema de información, por tanto, debería estar construido sobre tres bloques dependientes y relacionados (Goldratt, E.M, 1990):

- *Primer bloque: Programación.* Es la primera fase y la más básica del sistema donde se construye el plan de acción. En ella se generan los datos requeridos, datos que, en sí mismos, no están inmediatamente disponibles.
- *Segundo bloque: Control.* Este bloque busca controlar las desviaciones con respecto a un plan predeterminado. Luego, la planificación (programación) debe estar establecida antes que el control.
- *Tercer bloque: Simulación (¿Qué pasaría si...?).* Corresponde al vértice de la pirámide del sistema de información donde se trata de justificar una inversión, decisiones de compra, de diseño, etc. Este bloque se alimenta de los datos suministrados por sus predecesores y se centra en aspectos relacionados con la gerencia/dirección.

El Sistema de información que se propone, toma como referencia el modelo jerárquico descrito con anterioridad. Está pensado para la fase de operación de la STM+C elegida y la búsqueda de respuestas altamente optimizadas ante estímulos externos y/o internos. Uno de los objetivos básicos será comparar los efectos de varios cursos de acciones (efectos de diferentes regímenes o políticas de manteni - miento, decidir una compra o inversión, otros). Típicamente, la evaluación implicará comparar coste con valor añadido. La clave estará en evaluar la efectividad de una opción. La respuesta/salida (fenotipo optimizado) busca la "Efectividad total" del sistema.

La plataforma se articula en base a procesos dinámicos (evolutivos) de ayuda a la toma de decisiones para obtener, en cada iteración (evolución), alternativas /soluciones óptima/s globales que estén correlacionadas con la evolución de los parámetros del sistema o/y las condiciones del entorno (económicas, legales, etc).

El proceso evolutivo de optimización multicriterio se centrará en la búsqueda de lo mejor en cada momento del periodo evolutivo (equilibrio dinámico sistema – entorno). Por tanto, los diferentes procesos se actualizarán en función de los "activa -

(1) datos requeridos: parte de los datos que son necesarios para deducir la información requerida [Goldratt, E.M, 1990].

dores de evolución" en cada iteración. La/s función/es de restricción (condiciones de convergencia o contorno) vendrán definidas, para cada iteración, en el proceso 1(P1), donde se definen las condiciones actualizadas para las diferentes funciones del negocio (O&M, financiera, marketing) que han de verificar las alternativas (outputs).

En un sentido amplio, el proceso de optimización busca un conjunto de pará - metros que minimicen el LCC del sistema global; en un sentido más estricto, la optimización puede ser aplicada a actividades específicas, tales como: la optimiza - ción del diseño, del mantenimiento, de los repuestos, lo cual orientará futuros proyectos de Reingeniería (de negocio, de organización o de procesos).

Es conveniente aplicar una disciplina en el sistema para monitorizar la estructura de costes y la evolución de los KPIs de la solución adoptada, una vez implementada. Para cumplir con este objetivo, se disponen un conjunto de *"ventanas del sistema"*. La monitorización será muy útil para obtener datos reales que permitan:

a. Validar los valores de diseño de la STM+C seleccionada en el Nivel 1.

b. Establecer "set points" para detectar desviaciones del rendimiento proyecta – do (activación de "alertas tempranas") y brindar la oportunidad de activar, de forma proactiva, las acciones correctivas previstas en los planes de contingencia definidos en el nivel 1(optimización del ROI).

c. Actualizar los datos de cálculo mejorando, por iteración, la precisión de los resultados. Esto contribuirá a mejorar la calidad de determinadas decisiones (estima - ción de reemplazamiento, la planificación y programación del mantenimiento, otras).

d. Contribuirá también a construir una base de datos de calidad y gran valor pa- ra decisiones y estudios futuros.

La plataforma permitirá integrar conocimiento e información sobre diagnóstico y mantenimiento de equipos y sistemas, que hoy por hoy, no están relacionados. Ello permitirá una explotación integral en base al conocimiento incluido en diversas fuentes. La naturaleza del sistema requerirá el uso de conocimiento experto.

Para evitar la suboptimización, resulta interesante la búsqueda de nuevos modelos que combinen, de forma apropiada, elementos de las áreas de mantenimiento y producción-operación.

También resultarán interesantes los procesos de simulación. Permitirán ensayar diferentes políticas de mantenimiento y valorar dos aspectos relevantes para el apoyo y la toma de decisiones: los efectos sobre producción y otras funciones del negocio y los trade-offs de costes asociados.

El flujo de la información deberá estar correctamente coordinado con objeto de que pueda ser utilizado, de forma efectiva, en la gestión del mantenimiento (Figura 79):

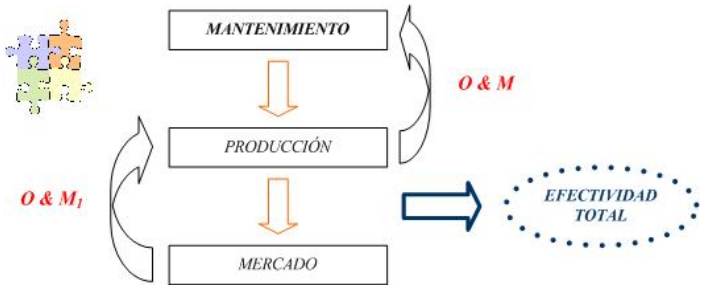


Figura 79: Interacción Mantenimiento - Producción (O&M) – Mercado (&M_1). El puzzle de la competitividad.

Por tanto, para la definición y desarrollo de la plataforma científico-técnica del Sistema Global se propone tomar como base el siguiente diagrama de flujo (figura 80):

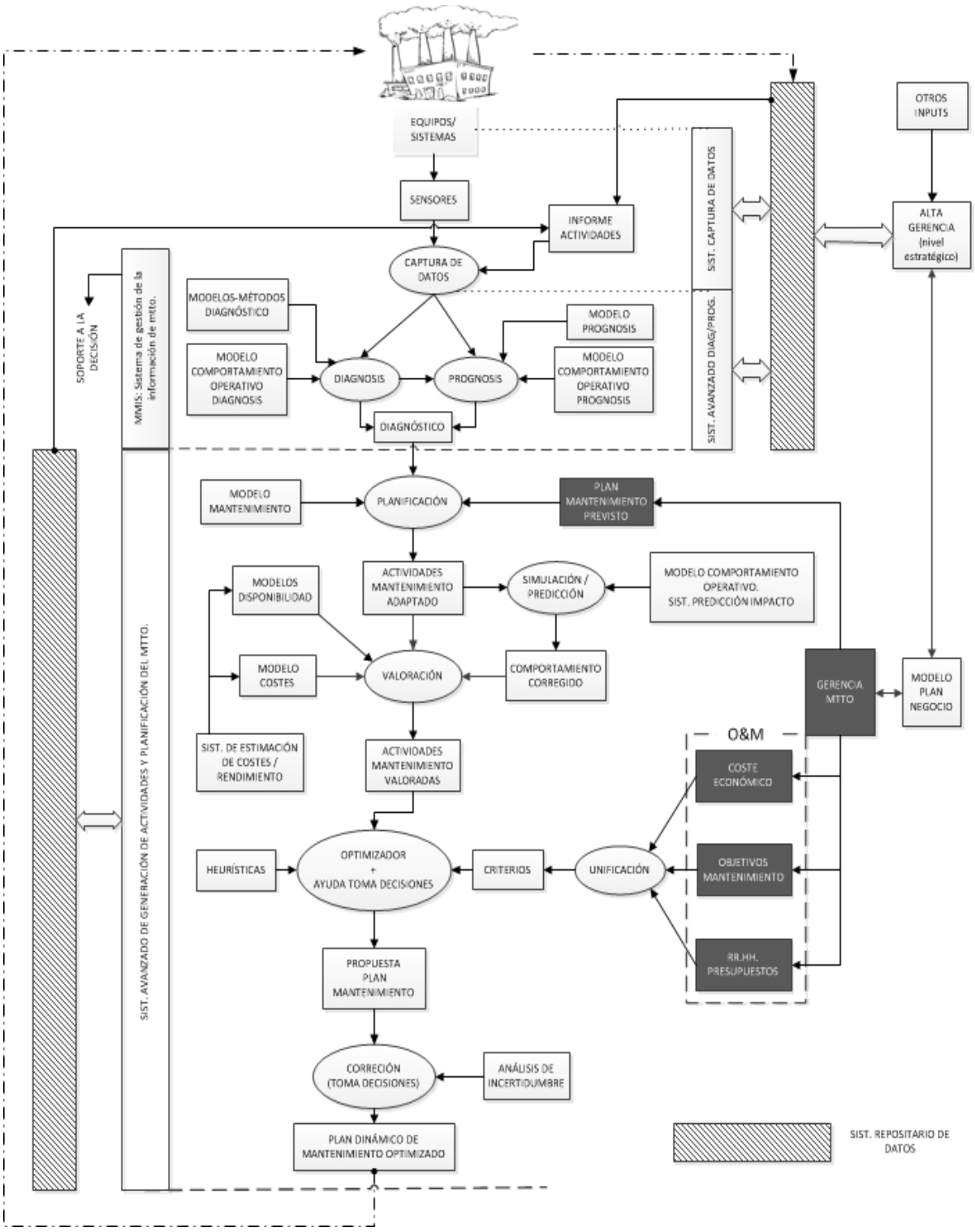


Figura 80: Diagrama sinóptico para el desarrollo de la plataforma científico-técnica del Sistema Global.

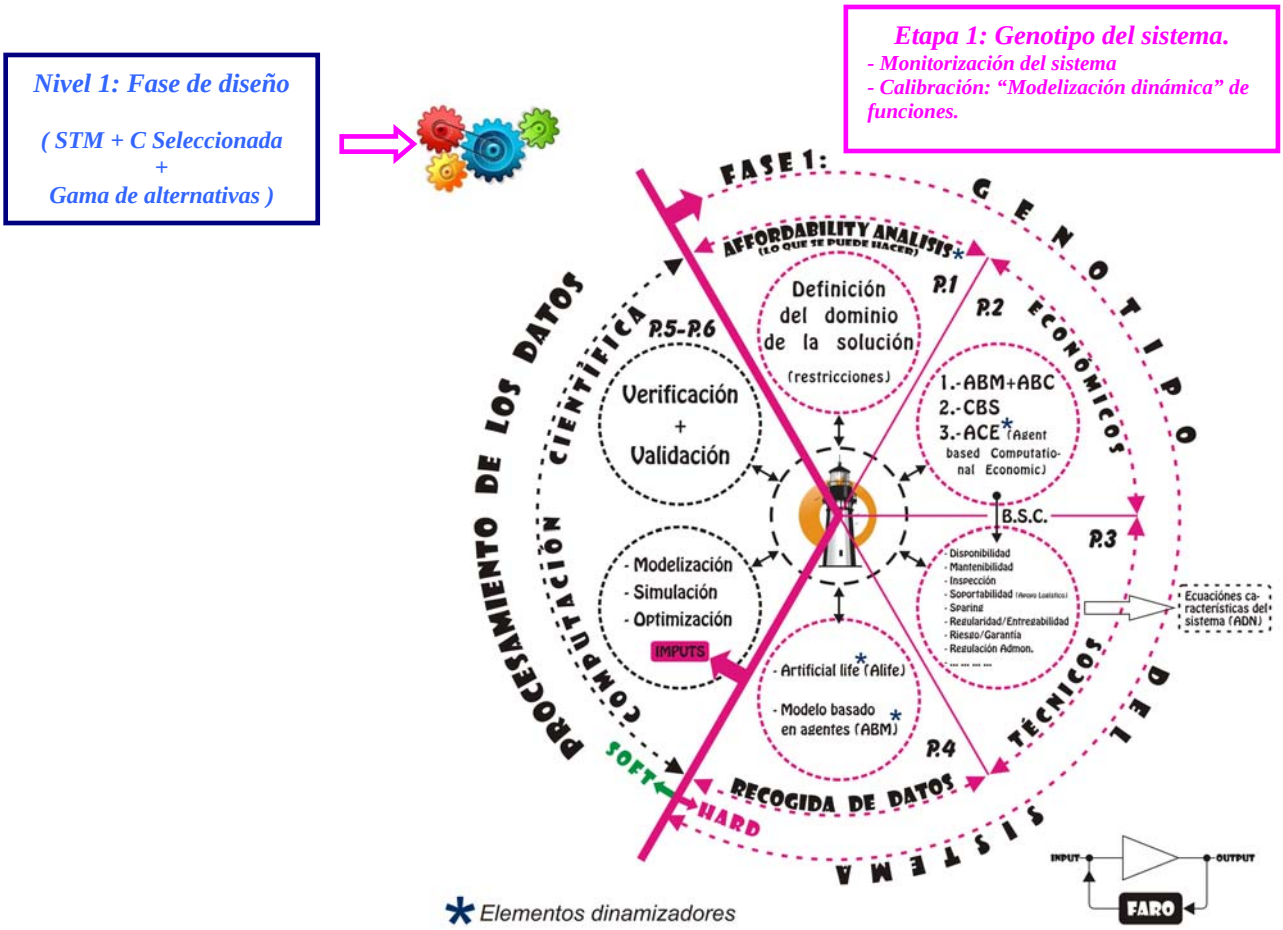
3.1. Proceso de decisión para el control y la gestión dinámica del ciclo de vida del sistema global. Fases del modelo propuesto.

La figura 81 muestra el proceso de decisión para el sistema de información propuesto para la gestión del ciclo de vida del sistema técnico global durante la fase de O&M. Para asegurar la máxima efectividad del modelo, los conceptos presentados deben ser debidamente "adaptados" al sistema o aplicación en estudio.

El modelo propuesto describe tres etapas diferentes de la O&M en la fase de operación/ Utilización (Nivel 2), que denominamos como: *Etapa 1* (Monitorización y "calibración" de la STM+C); *Etapa 2* (Régimen transitorio.Construcción del fenotipo optimizado del sistema); *Etapa 3* (Régimen permanente. Fase de diseño definitivo del fenotipo optimizado).

El enfoque y los pasos del proceso dependerán de la naturaleza del sistema (o aplicación en estudio) y del nivel de conocimiento y experiencia de los componentes/individuos del equipo nuclear de proyecto. Por esta razón, es muy importante la rigurosidad y objetividad en el proceso de definición y selección del equipo nuclear de reingeniería.

La figura muestra que el proceso ha de ser iterativo por naturaleza. Con la apropiada retroalimentación para el refinamiento de los elementos de detalle en el diseño, el proceso convergerá hacia una solución óptima, en cada momento. La definición funcional del sistema, sus subsistemas y componentes (Nivel 1) será utilizada como "línea base" para la identificación de los requerimiento de recursos en producción y operación (hardware, software, personal, datos,…, o combinación de estos).



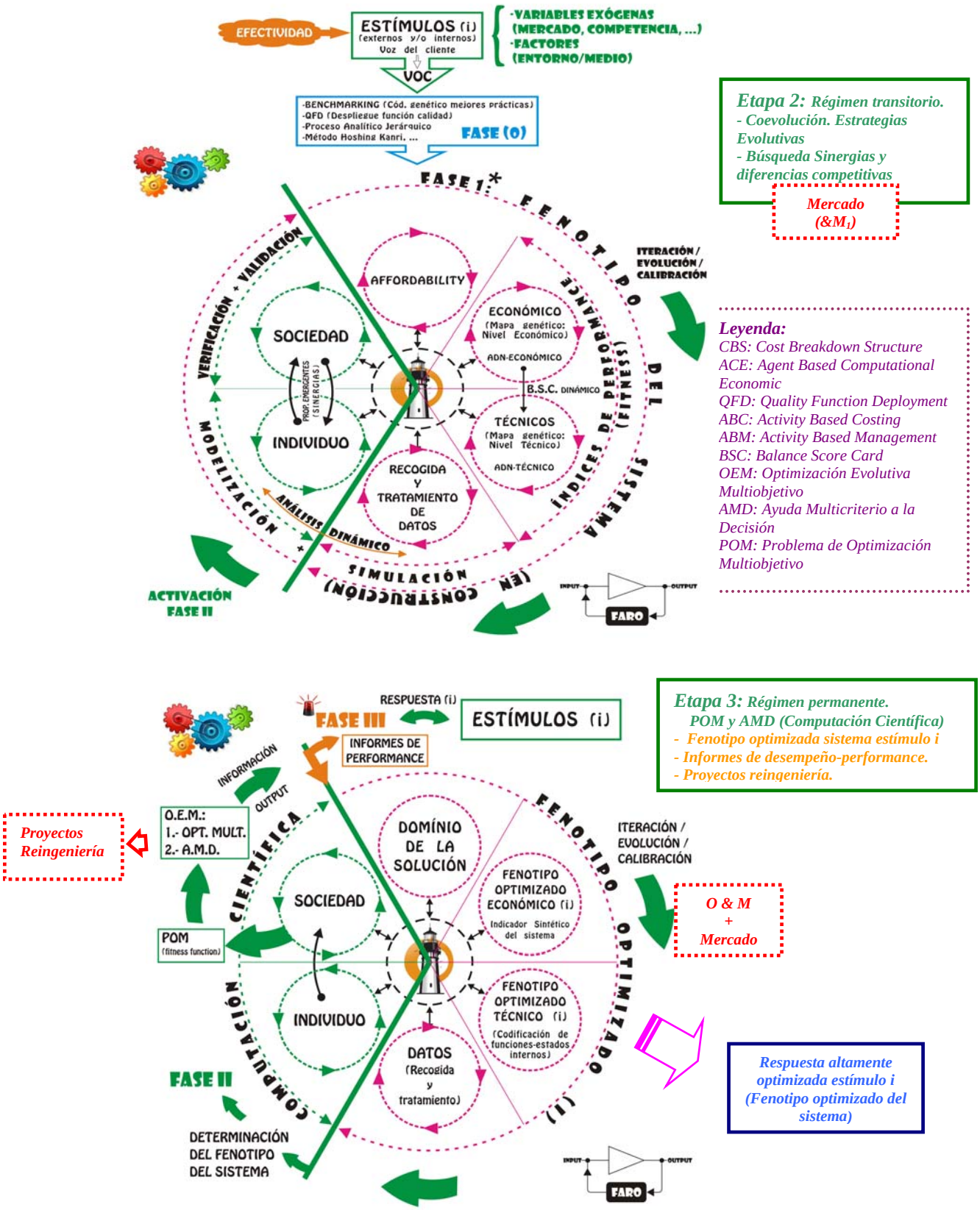


Figura 81: Esquema conceptual del proceso de decisión del Sistema de Información. Marco de referencia para la "Homeostasis Artificial del Sistema". Método faro.

Etapa 1. Monitorización y calibración de la STM+C.

En esta etapa es donde se define la monitorización de la STM+C seleccionada en el nivel 1 y la "modelización dinámica" de las funciones características a nivel téc - nico y económico. Se distinguen dos sectores:

- *Sector 1(hard).* Programación y control. Se consideran cuatro procesos, cuya finalidad es programar, controlar y calibrar el genotipo técnico y económico del sis - tema diseñado en el nivel 1. A su vez, se contemplan cuatro "ventanas del sistema" para la evaluación y control continuo de la configuración: Affordability analysis, ACE, Modelo Basado en Agentes y Alife.

- *Sector 2 (Soft).* Simulación (Computación científica). Se considera la modeli - zación funcional del sistema global a través de los datos obtenidos del sector 1 (da - tos de entrada) para su simulación y control (figura 81.1). La idea básica es la de proceso.

La experimentación con el modelo se realizaría después de que éste haya sido validado. Se generan los datos necesarios y se realiza un análisis de sensibilidad de los PI´s seleccionados.

El método propuesto para la simulación sería el sistémico.

El objetivo del modelo de control -optimización es ayudar a decididir qué nuevas medidas, variables o qué parámetros deben ajustarse para lograr un resultado o estado concreto del sistema modelado.

Etapa 2. Régimen transitorio:"Homeostasis artificial del sistema".

Los "óptimos globales" no son estáticos. La alteración/modificación de la condiciones externas/internas exige que el espacio solución evolucione en sintonía, lo que requiere un proceso dinámico de búsqueda de óptimos. Los "activadores de evolución" obligan a una calibración dinámica del sistema para dar una respuesta eficaz y eficiente en cada momento.

En esta etapa se propone un modelo para migrar de la "situación actual" a la "situación óptima" mediante aprendizaje evolutivo. El objetivo es mejorar el nivel de competencia de la STM+C seleccionada mediante su adaptación o reestructuración.

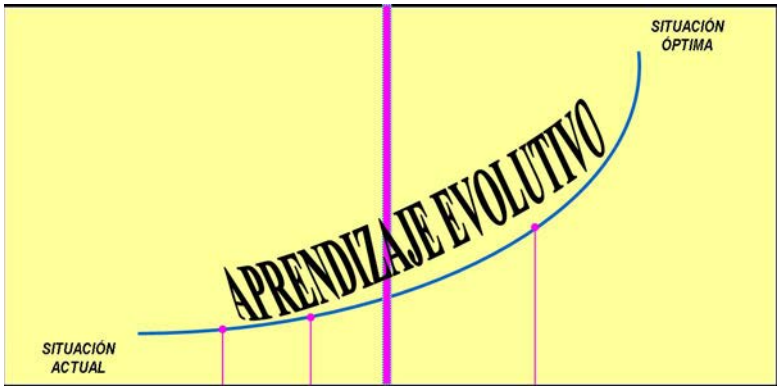


Figura 82: Aprendizaje evolutivo para la mejora de la STM+C.

Para la simulación de la evolución se propone utilizar algoritmos evolutivos y modelización a través de la filosofía *"artificial life"*.Esta filosofía estudia la lógica de sistema en la fase de operación (*Living system*).Se propone incluir "Sistemas Basados en Agentes (*ABM: Agent Based Model*) para estudiar las "propiedades emergentes" de la "sociedad de agentes".

Difiere de la técnica de modelización tradicional porque estudia no sólo la "vida como es", sino que también contempla el estudio de la "vida cómo podría ser". En la primera iteración, el modelo tradicional se centra en capturar los parámetros más importantes. En la "*modelización Alife*", la búsqueda se centra en descifrar los principios más simples y generales que subyacen al funcionamiento para su imple - mentación en el proceso de simulación, lo que permite nuevos análisis.

Centrado sobre las necesidades detectadas, el modelo propuesto, como primer pa- so, se inicia con un estudio de benchmarking. La adopción de forma conveniente de las mejores prácticas contribuirá a construir soluciones adaptadas, de mejor calidad y más coste efectivas en O&M basadas sobre diseños estándar.

La identificación de una nueva necesidad, o la evolución de la misma, demanda - ría una respuesta en forma de nuevo requerimiento al sistema. A su vez, la necesidad puede ampliarse o contraerse. Es importante su estabilización (preferiblemente en base a una evaluación consensuada con el cliente *valor vs. coste*) en el tiempo más breve posible.

El tiempo en identificar un problema de fondo suele ser menor que el tiempo necesario para eliminarlo. (Goldratt, E.M, 1990)

La infraestructura de apoyo para el desarrollo de esta etapa, y las bases propuestas para su despliegue, quedan recogidas en las figuras 83 y 84:

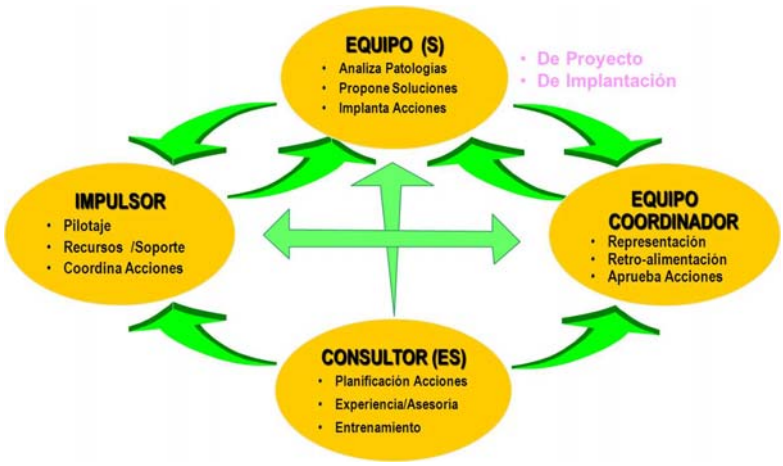


Figura 83: Infraestructura de apoyo.

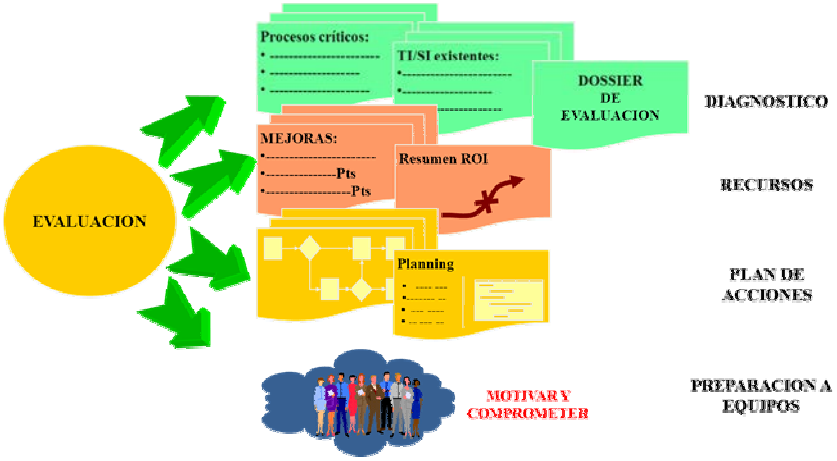


Figura 84: Bases para el despliegue.

Etapa 3. Régimen permanente. Fenotipo optimizado del sistema.

El régimen permanente se construye sobre la base de equilibrios dinámicos (equilibrios inestables) sistema – entorno. Los márgenes de tolerancia asociados a las condiciones de restricción (Affordability analysis: programación) vendrán condicio - nados por los "coeficientes de elasticidad" y los "grados de libertad" considerados en el nivel 1 a la hora de obtener las gamas de alternativas que acompañan a la STM+C seleccionada (análisis de escalabilidad).

En esta etapa, se define la nueva configuración (adaptada o reestructurada: Fenotipo optimizado del sistema) para dar una respuesta altamente optimizada al estímulo i.

Los problemas a resolver se prevén que sean Problemas de Optimización Multi – objetivo (POM), para los que habrá que utilizar Algoritmos Evolutivos Multiob- jetivo (AEMO´s). Por tanto, los proyectos de reingeniería serán claves para la mejora de los resultados.

La operativa propuesta para la implantación de la solución se desarrollaría en base al siguiente esquema (figura 85):

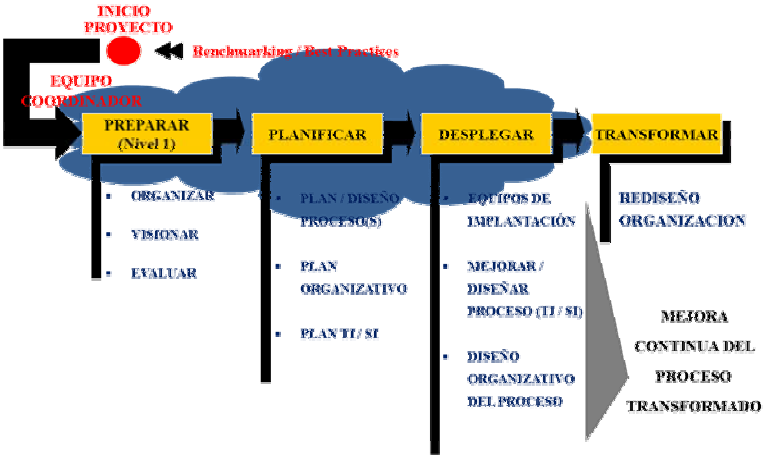


Figura 85: Operativa de implantación.

Los objetivos se alcanzarán mediante el desarrollo de una plataforma abierta y flexible en conjunción con una apropiada definición de la estructura organizativa y funcional (figura 86):

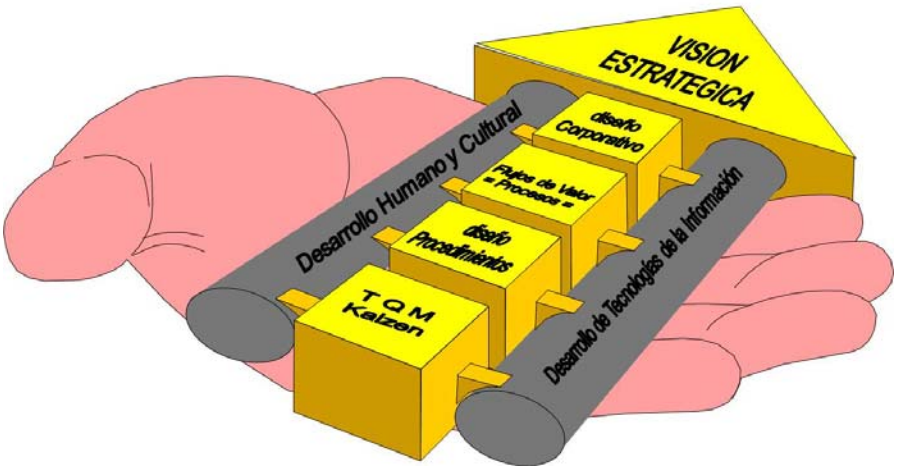


Figura 86: Definición equilibrada de la estructura organizativa y funcional.

3.2. Descripción conceptual de la Estructura del Sistema Global.

Definir "*información" como la respuesta a la pregunta formulada* significa que la información sólo se puede deducir de la utilización de un *proceso de decisión*. Se deben cumplir dos condiciones para adquirir información: datos y proceso de decisión. Un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final; también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de exactitud. (Goldratt, E.M, 1990)

3.2.-1. Sistema de Información para la Gestión y control. Informes de funcionamiento.

Recibir retroalimentación sobre el funcionamiento es esencial para cualquier área de gestión; por tanto, también para la Gestión del Mantenimiento. Esta área representa una de las funciones claves para soportar la Gestión de Operaciones dentro del marco de la O&M. Un sistema eficiente de información del funcionamiento debe cumplir tres requisitos básicos:

a) Informar, de forma fiable, rigurosa y en tiempo real, del funcionamiento de los aspectos vinculados al área de gestión. Para alcanzar este objetivo, es necesario la <u>*Selección de Indicadores (KPI´s) y la definición y diseño del Panel de Control.*</u>

b) Ofrecer la oportunidad de realizar un análisis más detallado, sobre la base de datos e información actualizados, sin la necesidad de investigar demasiado tiempo. Este requisito supone <u>*Definir y diseñar un Generador de Informes de Detalle*</u> **(**con base en información actualizada).

c) Servir de herramienta de apoyo al decidor en el proceso de toma de decisiones de forma objetiva. Para alcanzar este tercer objetivo, es necesario procesar, con base científica (objetiva), los datos pertinentes con objeto de generar la información relevante que exija la situación objeto de estudio. Supone la necesidad de <u>*Selección del kit de herramientas adaptadas a las necesidades definidas y la definición y el diseño de un Módulo a agregar a los sistemas MMIS y CMMS.*</u>

Los objetivos anteriores requieren la integración: de una base de datos (consistente, actualizada y bien gestionada), una documentación técnica actualizada y un kit de herramientas/metodologías apropiadas que permitan transformar los datos de entrada en información relevante, fiable y actualizada para apoyar, de modo informado, la toma de decisiones en la búsqueda de soluciones efectivas y eficientes. De igual modo, es necesario definir las funciones y la arquitectura modular de la estructura de control que dé soporte al sistema anterior. En la práctica, son muy pocos los sistemas de información que satisfacen los requerimientos anteriores.

En este trabajo de tesis se proporcionan las directrices (no un análisis completo) para desarrollar una herramienta que brinde una información organizada del funcionamiento y ofrezca la oportunidad de controlar los efectos sobre las actuaciones realizadas. No se trata sólo de establecer un conjunto de KPI´s bien seleccionados, sino de definir una herramienta integrada para la gestión y control dinámico del ciclo de vida del sistema.

- *Sistema de Información para la Gestión del Funcionamiento en Mantenimiento: (SIG - FM).*

En la práctica se constata que los equipos de gestión se enfrentan a una abundancia de información que resulta a veces difícil de abordar. Se requiere un paso adicional que discrimine entre señales importantes e información de rutina. Los gestores sufren más que de la pérdida de información relevante de una sobreabundancia de información irrelevante.

Un sistema eficiente de información del funcionamiento no sólo debe informar del funcionamiento pasado, sino además, debe ofrecer la oportunidad de realizar un análisis más detallado sin la necesidad de investigar demasiado tiempo en la información disponible. Existe una necesidad real en la práctica de un sistema de este tipo que, a su vez, sirva de apoyo al decidor para soportar, con criterios objetivos, la toma de decisiones en los diferentes niveles: estratégico, táctico y operativo. Se trata de definir un sistema más estructurado e integrado de lo que se conoce actual - mente a través de la literatura, que cumpla con dos propósitos básicos:

a) Servir como herramienta para el equipo gestor (nivel operativo) para apoyar la toma de decisiones para reducir los costes integrales del mantenimiento.

b) Actuar como vehículo para la investigación en la toma de decisiones a nivel táctico y estratégico. Esto representa un reto a la hora de ayudar a predecir el impacto que determinadas acciones u omisiones (decisiones) adoptadas en, o sobre, mantenimiento, pueden tener en otras áreas del sistema. Por ejemplo: el establecimiento de un nuevo programa de PM, la optimización del uptime y el downtime, las potenciales soluciones para optimizar el backlog. El objetivo sería valorar las diferentes alternativas posibilitando el cálculo estimado de los retornos potenciales. También resultaría interesante para los programas de mejora continua.

A un nivel más avanzado se podría plantear la integración de un sistema de este tipo en un DSS con objeto de ayudar a seleccionar la solución más apropiada para el área donde el problema fue detectado.

Una de las metas del sistema sería transformar la abundancia de datos, a menudo encontrados en la práctica, en información seleccionada y útil para la gestión.

El estudio analizado en la *Introducción y definición del problem a* (apartado 1. Antecedentes) revela, como datos más destacados, los siguientes:

- Existe una muy limitada aplicación de herramientas que estén enfocadas a la Gestión del Mantenimiento, sobre todo, con criterios o base económica. Se consi - deran tres motivos básicos: falta de herramientas que se adecuen a la realidad de la planta, falta de datos y falta de encuentro (gap) entre la teoría y la práctica.
- La mayoría de las empresas industriales no cuentan con procedimientos de captura y análisis de datos.
- La necesidad de estructurar la función Mantenimiento; es decir, establecer las bases de un sistema de gestión que sirva para recopilar, analizar y mejorar las acti - vidades realizadas .
- Que la estructura definida sirva como herramienta de apoyo a la toma de de - cisiones.
- La necesidad de investigar en el desarrollo de técnicas que estén enfocadas a la optimización de la gestión del mantenimiento y que estén centradas en el usuario final.

▪ ***Estructura básica del sistema de información.***

Se desarrolla una forma de organizar y presentar la información de un modo más estructurado y sistemático, con dos objetivos básicos:

1) servir como soporte a las decisiones, a nivel de gerencia en mantenimiento, para controlar los efectos sobre las actuaciones realizadas en un entorno industrial(nivel 1);

2) servir como vehículo de investigación para determinar las causas asociadas a los síntomas y tomar decisiones en mantenimiento (nivel 2).

Se trata de definir una herramienta que brinde una información estructurada y organizada del funcionamiento para facilitar el control y la gestión dinámica del ciclo de vida del sistema. A diferencia de lo observado en la mayoría de grupos de PI´s encontrados en la literatura, el sistema debería recoger todos los aspectos relacio - nados con la Gestión del Mantenimiento.

El funcionamiento del mantenimiento puede ser estudiado en profundidad en base al análisis de cinco áreas básicas: *gastos (costes)*; *equipos* (rendimiento – fun - cionamiento: datos técnicos, histórico completo con los resultados de las revisiones realizadas, información de incidentes, programa de revisiones previstas, etc.); *personal (rendimiento/funcionamiento)*; *materiales (gestión) y trabajos* (control de órdenes).

La selección apropiada de los indicadores y los niveles de agregación de la información permitirá brindar aquella información que resulta relevante y que está bajo el control de la gerencia/dirección de mantenimiento.

La estructura propuesta consistiría de tres niveles (capas) vinculados funcional- mente:

- *Primer nivel (más operativo).*Vendría representado por lo que sería un panel o cuadro de control. Mientras que en la literatura, y también en la práctica, los *PI´s* son considerados de forma aislada, en este nivel se busca un enfoque integrado de las cinco áreas básicas del funcionamiento del mantenimiento. El enfoque dinámico del *Panel de Control* ayudaría a detectar aquellas áreas de la Gestión del Manteni - miento donde algo está sucediendo (síntomas), así como a valorar el impacto de las decisiones tomadas y a establecer los rangos óptimos para algunos clusters de ratios.

La implantación práctica del cuadro de control puede requerir ciertos niveles de adaptación con objeto de recoger las necesidades específicas del sistema, lo cual exige un cierto grado de flexibilidad en su definición.

La idea de un único conjunto de medidas de funcionamiento, como es a menudo sugerido tanto en la literatura como en la práctica, sería arriesgada al resultar muy rígido, simple y no muy útil para gestionar operaciones.

El diagnóstico de los síntomas se realizaría en un segundo nivel, mediante la consulta de un conjunto de informes detallados (gráficos y tablas), sobre diferentes niveles de agregación y vinculados funcionalmente. Esta vinculación funcional entre ambos niveles busca establecer un diagnóstico, de forma efectiva y eficiente, mediante la generación de una red estructurada de informes representativos. No se trataría de un “sistema experto”. Es una herramienta que asistirá al equipo de gestión (ingeniero y director de mantenimiento) en la toma de decisiones, pero no lo sustituye. El conocimiento y la experiencia es necesaria para interpretar los resultados. Los niveles de atención y alarma no serían generados automáticamente por el sistema, sino que serían establecidos por el equipo de gestión, en función a la experiencia, las idiosincrasias propias de los equipos y procesos, así como de otros criterios que se establezcan a nivel corporativo.

- *Segundo nivel (Generador de Informes Detallados).*Vinculado con el primer Nivel, actuaría como vehículo de investigación para tomar decisiones a nivel táctico y/o estratégico. Este nivel estaría constituido por diferentes tipos de informes en los cuales se recogen, de forma desagregada, la información del Panel de Control. El objetivo es brindar al gestor de mantenimiento un proceso eficiente de búsqueda guiada que le permita analizar los síntomas detectados en el *Cuadro de Control.*

Se generan aquellos informes que sean preceptivos para determinar la /s causa/s y poder establecer un diagnóstico- pronóstico y tomar decisiones.

- *Tercer nivel.* Estaría formado por un módulo para la propuesta de soluciones óptimas globales. El objetivo sería ayudar a elegir la solución óptima (a nivel global, no local) más apropiada para el área donde el problema fue detectado.

El análisis se realizaría en base a un conjunto de herramientas avanzadas y adaptadas a las causas identificadas en el nivel anterior.

- ***Pasos previos a la construcción del sistema.***

Los siguientes pasos deberían ser tenidos en cuenta a la hora de construir el sistema:

(a)Localización de los focos de problemas: Análisis del sistema.

Este análisis resulta fundamental para establecer las medidas específicas, el conjunto de metas y objetivos, las áreas del sistema a ser monitorizadas, etc. La atención puede ser centrada inicialmente sobre las áreas detectadas con problemas.

(b)Experiencia piloto. Identificación de los Indicadores Pilotos Claves (IPC´s).

El proceso debería iniciarse con un estudio piloto en planta. Se recomienda utilizar pocos *Indicadores Pilotos Claves (IPC´s)"* antes de comenzar con el sistema de PI´s global. Tres objetivos básicos:

1º. Adquirir confianza y compromiso. Al centrar el estudio sobre pocos indicadores en áreas potenciales de problemas permite ganar la confianza por parte de todo el personal de la compañía en el proyecto. Ello hará que se comprometan abiertamente en la aportación de sugerencias para mejorar. La experiencia de éxito genera la confianza suficiente para asumir el reto de los cambios requeridos para hacer extensiva la experiencia.

2º. Focalización. Permitir a la gerencia ganar experiencia en el establecimiento de objetivos y metas que sean realistas/alcanzables a corto-medio plazo.

3º. Flexibilidad. Dado el alcance limitado de la experiencia piloto se podría plantear un sistema manual de recogida de datos antes de plantearse un sistema automático. Ello sería muy interesante para identificar las redes de flujo (oficial y oficiosas) de información, los "cuellos de botella "en la información, la intensidad con la cual los canales de información son usados y mal usados, la calidad de los datos. Comenzar con un sistema manual permite dar respuesta a los defectos detectados y establecer, con criterio, una vez introducidos los cambios exigidos, las especificaciones del sistema automatizado en función a las necesidades reales.

(c)Implementación a gran escala.

Después de la experiencia adquirida en la fase piloto es posible extender, con mayores garantías de éxito, el sistema PI a escala total, e incluso, su integración con otros sistemas de información *(MRP, MMIS, otros).* El objetivo principal en esta fase sería generar buenos informes.

(d)Definición de Indicadores.

Después de que las áreas con problemas estén claras, y bien definidas, es cuando se procedería a establecer el conjunto de indicadores específicos que nos permitan realizar su control. Esta es una de las etapas más importantes y delicadas de todo el proceso. Estos indicadores resultan básicos para poder establecer las políticas de mantenimiento ad hoc. La experiencia demuestra que una forma efectiva y eficiente de enfocar esta tarea, es plantear la definición del conjunto de PI´s desde dos ángulos diferentes. Por un lado, las personas que van a utilizar la información representan una pieza clave en la definición del proceso. Por otro lado, hay que tener muy en cuenta a

las personas que van a procesar los datos, dado que son las que deben reaccionar rápidamente para cambiar los parámetros del sistema.

La recogida de los datos es una cuestión muy importante para el éxito de la aplicación. Al final del proceso de análisis debe emerger un conjunto de PI´s consensuado por ambos grupos de interés. Quizás, un trade-off posterior será necesario entre rapidez, facilidad de acceso a la información y precisión en la definición. Habrá que poner en valor lo que al usuario le gustaría tener idealmente y lo que puede tener rápidamente.

(e)Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones.

Finalmente, podría elevarse el sistema PI a un sistema totalmente integrado de apoyo a la toma de decisiones, donde los PI´s no informasen únicamente sobre el estado del almacén, compras, etc, sino que fuese de utilidad para iniciar y guiar acciones de mejora en sintonía con los*" activadores de evolución"*.

- ***Reglas generales para la selección y definición de los PI´s.***

De acuerdo con la función asignada al Panel de Control, es importante tener en cuenta las siguientes reglas, de carácter general, a la hora de seleccionar y definir los PI´s (Maes, Pintelon y Van Wassenhove, 1989):

- *Sintonía (utilidad):* los indicadores de funcionamiento deben estar en sintonía con los objetivos establecidos(a nivel estratégico, táctico y operativo). Su contribución para orientar el alcance de la meta debe estar clara.
- *Visibilidad:* deben ser relevantes y transparentes con objeto de facilitar la identificación de los síntomas.
- *Definición:* en el proceso de definición de los PI´s deben participar aquellas personas que están implicadas, de forma directa o indirecta, en la utilización e interpretación de los mismos. Esta fase es crítica y en ella se debe, mediante técnicas de trabajo en equipo, sugerir, analizar constructivamente y redefinir hasta conseguir el consenso sobre su utilidad. Solamente a través de una definición rigurosa del ratio se podrá medir lo que realmente se quiere medir. A veces, será preferible usar una definición que no es correcta al 100%, desde un punto de vista teórico, pero que ha sido usada durante años y es entendida y aceptada por todos los agentes implicados. El punto clave es alcanzar un acuerdo sobre el propósito del PI y su definición (una y sólo una) y asegurarse de que el dato es calculado correctamente.
- *Poder de control (nivel de influencia):* los indicadores seleccionados deben informar de aquellas partes del sistema que estén bajo la influencia y control de la función mantenimiento.
- *Cálculo:* el método de cálculo así como el procedimiento de recogida de los datos deben ser definidos con claridad y rigurosidad para cada PI. La definición debe permitir la validación de los datos de entrada (por ejemplo, dejar claro en qué punto/s del proceso el dato debe ser recogido, como debe ser interpretado).
- *Consistencia:* no deben ser influenciados por la inflación, las tasas de interés, etc.
- *Nivel de comparación:* los PI´s tendrán como misión principal controlar las desviaciones y permitir establecer hipótesis sobre las posibles causas. Se comparará un mismo PI en diferentes periodos de tiempo (homogeneidad).

Una cuestión que a menudo se presenta entre los responsables de mantenimiento es la necesidad de saber cómo lo están haciendo en comparación con la competencia. Existe la necesidad de disponer de una referencia (patrón) de medida que les permita evaluar su rendimiento/funcionamiento. Esta idea, aunque muy atractiva e interesante

desde un punto de vista teórico, resulta poco realista desde un punto de *vista práctico.* Incluso adoptando las compañías de un mismo sector la misma definición para un determinado ratio, los factores propios que definen cada sistema (capacidad de producción, antigüedad, tecnología, etc.) hacen que las cantidades no sean homo - géneas, por lo que la utilidad de la comparación, como instrumento de gestión, es bastante limitada.

- *Clusters de ratios:* otra área de interés está centrada en la definición de los"*cluster de ratios interconectados*"y la determinación de los rangos deseados para los valores de los ratios en esos cluster como fuente de información para:

(a)Búsqueda de óptimos globales a través de la valoración de los efectos que las actuaciones en mantenimiento tienen sobre determinadas variables cuantitativas del sistema.

(b)Equilibrado de actuaciones. La interrelación entre ratios del *P.C.* puede ser de utilidad para evaluar el efecto que determinadas acciones desarrolladas para mejorar el comportamiento de un ratio tiene sobre otro y de este modo poder balancear los efectos.

(c)Auditoría. El valor de un ratio aislado puede no tener mucho significado. Sin embargo, el valor de cierto cluster de ratios, cuando son considerados de forma conjunta, puede mostrar información sobre la salud financiera de la empresa.

- *Nivel de agregación*: el exceso de agregación en un único ratio puede obscurecer la información y ocultar información útil. Lo recomendable es utilizar un número corto de ratios para cada tema (por ejemplo: financiero, personal, materiales, equipos, servicios).

- *Integridad y oportunidad:* los PI´s agregan mucha información de detalle, por lo que es fundamental que los datos utilizados para su construcción sean fiables. Es importante no utilizar datos que hayan sido manipulados o suministrados de "boquilla".

- ***Red de Informes.***

El objetivo de la red será brindar al gestor de mantenimiento un proceso eficiente y de búsqueda guiada que le permita analizar los síntomas detectados en el Cuadro de Control. La red (figura 87) estaría formada por diferentes tipos de informes en los cuales se recogen, de forma desagregada, la información del Panel de Control.

La figura 88 ilustra la relación funcional entre el Panel de Control y los Informes de Detalle para el caso de control del mantenimiento.

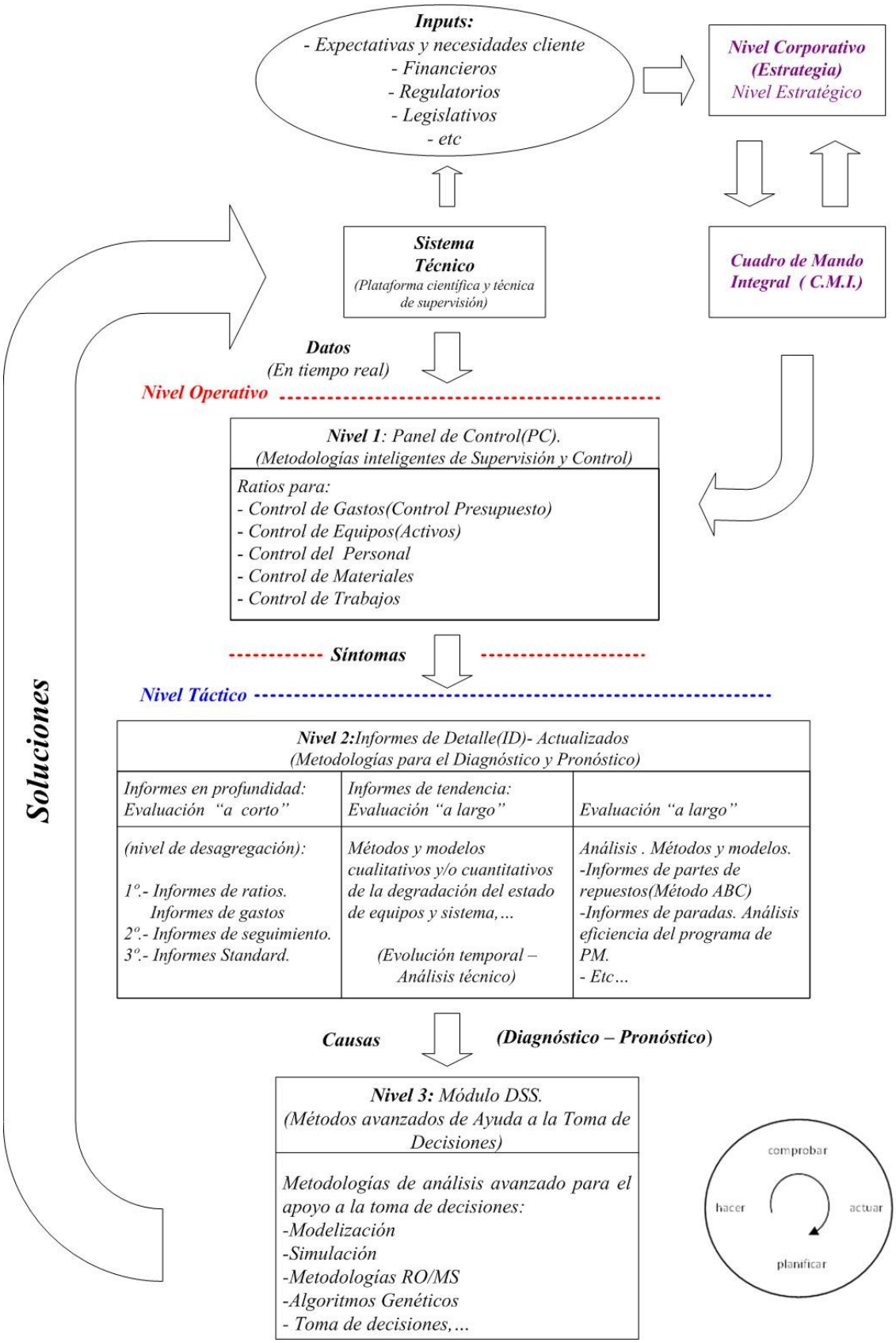


Figura 87: Diagrama de flujo de la información. Estructura de la red de informes.

Primer nivel: PANEL DE CONTROL.

PANEL DE CONTROL – PERIODO T					
Equipos: *(10) Disponibilidad*					***¡Alerta! Baja disponibilidad***

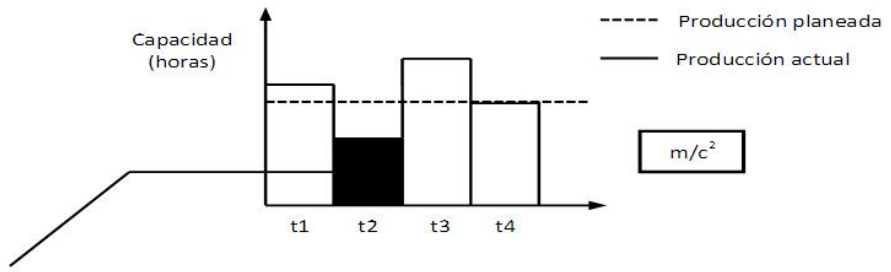
¿Es motivada la alerta por la situación de uno o varios equipos?

Segundo ninel: INFORMES DE DETALLE.

(1º) INFORMES EN PROFUNDIDAD (RATIOS) - PERIODO T			
Disponibilidad	*Actual*	*Esperada*	*Alertas*
Máquina 1 ***Máquina 2*** *Máquina 3*			***Baja***

¿La disponibilidad de la máquina 2 fue baja durante todos los subperiodos de T ?

(2º) INFORMES EN PROFUNDIDAD (SEGUIMIENTO) - PERIODO T



¿Cuál fue la causa de la baja disponibilidad de la máquina 2 en t2?

(3º) INFORMES EN PROFUNDIDAD (STANDARD) - PERIODO T

Informes de turno máquina 2

Figura 88: Ilustración de la relación funcional entre el P.C. y los I.D.: Control del mantenimiento.

En función de la información requerida para el análisis del síntoma, los informes se pueden estructurar en tres niveles:

(a) Informes en profundidad.

Suministran información ”a corto” del funcionamiento del mantenimiento. El objetivo es dar respuesta a cuestiones relacionadas con las desviaciones de compor - tamiento de los PI´s del Panel de Control. La estructura de estos informes estará en sintonía con los niveles de agregación de los datos; a su vez, estos niveles estarán en sintonía con el nivel de detalle requerido. Lo normal es considerar tres niveles:

(a.1) Informes de ratios y gastos.

El primer nivel de agregación consistiría del informe de ratios y gastos para ayudar a localizar las causas de los síntomas.

El contenido del informe de ratios y el del Panel de Control sería muy parecido, con la salvedad de que la información contenida en el primero estaría a un nivel más bajo de agregación.

En el informe de gastos, más que ratios, su contenido estaría formado por cifras absolutas. Este informe permitiría evaluar las desviaciones que se pueden producir sobre lo presupuestado. El modo más efectivo de presentar la información sería en forma de tabla (matriz), lo cual permitiría un mayor nivel de desagregación (detalle). La matriz de costes totales es otra forma de presentar uno de los informes de ratios. En el próximo nivel de agregación la matriz puede contener: costes de personal por gremio, costes de materiales por línea de producción, costes de subcontratación por línea de producción, etc. El nivel puede bajar más y considerar el coste por grupo de máquinas o por máquina individual, etc. En el Panel de Control aparecería la matriz de coste total.

(a.2) Informes de seguimiento o control.

El objetivo es poder ubicar el problema en el tiempo. En estos informes, el periodo *T* en estudio (por ejemplo, un mes) se divide en subperiodos (semanas, *t1, t2, t3, t4*). El propósito es visualizar la evolución de un indicador específico del funcio - namiento. El formato más apropiado de representación sería el gráfico (diagrama de barras, curvas de tendencias, otros).

(a.3) Informes estándar.

Permiten al usuario investigar a nivel fino, de detalle. Estos informes serán los utilizados diariamente a nivel de planta. Las entradas básicas serían: órdenes de trabajo, informes de turno, informes de producción. Serán de utilidad cuando sea necesario un análisis a nivel más fino (nivel de detalle).

(b) Informes de tendencia.

El objetivo es, en base a los datos históricos disponibles sobre un determinado PI´s, poder establecer extrapolaciones, y por consiguiente, previsiones de comporta - miento para el periodo *T+1*. Dentro de este tipo de informes serían importantes:

- Cargas de trabajo del personal: dimensionamiento de la plantilla, necesidades de contratación/ subcontratación, etc.
- Características de fallo de la instalación.
- Costes de mantenimiento: evaluación de los programas de mantenimiento, etc.

(c) Análisis: Informes.

Los análisis a realizar vendrían determinados por las necesidades definidas por la gerencia/cliente. Cabría mencionar:

- Programación del almacén: análisis de la demanda de repuestos. La metodo - logía a utilizar sería un análisis clásico *ABC.*

- Evaluación de los programas de mantenimiento preventivo. Análisis de la ocurrencia de fallos, mediante el análisis del downtime.
- Estudio de la correlación entre el fallo de equipos y la calidad del producto.
- Efecto de diferentes tipos de productos sobre las características de fallo del equipo.

Como los informes de tendencia, este tipo de informes deberían también suministrar información sobre diferentes periodos de tiempo. El sistema de generación de la información debería ser lo suficientemente flexible para permitir al usuario poder mejorar el nivel de detalle de su investigación, y de este modo, reducir los niveles de incertidumbre en la toma de decisiones.

La lista de informes presentados aquí no es exhaustiva. Para cada sistema técnico se adaptaría (personalizar) la red de informes y los niveles de detalle (agregación/desagregación) a sus necesidades.

- ***Directrices generales para construir la red de Informes.***

- *Autonomía: los informes de detalle deben autosoportarse;* esto es, deberían contener toda la información necesaria para leer y entender el contenido evitando tener que recurrir a información adicional recogida en otros informes.
- *Funcionalidad.* Con objeto de permitir una búsqueda más eficiente en la *red de I.D.*, los informes de detalle deberían contener información sobre su localización y función en la red de informes.
- *Uniformidad.* Deberían ser los más uniformes posibles con objeto de facilitar su consulta.
- *Selección.* Es importante seleccionar un número reducido pero lo suficientemente representativos. El usuario tendría la posibilidad de generar aquellos otros que le fueran necesarios.
- *Relevancia estadística.* Es un aspecto fundamental a considerar en el proceso de agregación/desagregación. Por ejemplo, la probabilidad de ocurrencia de un determinado suceso y la frecuencia del mismo es lo que puede justificar o no el seguimiento de la situación.
- *Duplicación.* Con objeto de favorecer una estructura de la red clara y transparente no es deseable que la misma información esté representada dos veces (tabla y gráfico) en un informe de detalle. Debe seleccionarse la forma de representación más apropiada para cada ratio, aunque a veces, un pequeño grado de duplicación sea necesario e incluso deseable.
- *Presentación de la información.* La representación gráfica de la información suele ser la más deseable pues es la que permite una interpretación y análisis más claro y eficiente.

3.2.-2. Definición de funciones y arquitectura modular de la estructura técnica de control.

El Sistema Global propuesto estaría formado por los siguientes sistemas:

- *Sistemas de captura de datos.* Serían los encargados de la adquisición del conjunto de datos de entrada al Sistema Global a partir de los equipos objeto de monitorización empleados en los procesos asociados a las diferentes etapas de producción. Entre otros, se contemplarían los siguientes equipos y/o procesos:

• *Equipos de medida.* Representan al conjunto de aparatos y sistemas (software o hardware) encargados de realizar las medidas de las señales a partir de los equipos objeto de monitorización (Instrumentación de campo, convertidores, etc.).

• *Procesamiento de señales.* Representa el proceso mediante el cual, una vez realizada la toma de datos, se tratan las señales para obtener información útil y manejable.

• *Informe de actividades*. Mecanismo para poder incorporar en el sistema alteraciones o actividades que han sido realizadas sobre los equipos monitorizados.

- *Sistema avanzado de diagnosis/prognosis.* Se encargaría de analizar los datos recogidos por el sistema de captura de datos, identificar y prever anomalías en el sistema y sus causas raíces. Estaría constituido por los siguientes sistemas:

• *Sistemas avanzados de detección de malfuncionamiento.* Estos sistemas estarían encargados de la detección de anomalías o malfuncionamientos en los equipos monitorizados. Se introduciría dentro de este sistema la figura de un coordinador que realizará las tareas de gestión y coordinación entre los distintos sistemas de detección y con el resto del sistema.

• *Sistemas avanzados del diagnóstico de fallos.* En este sistema se englobarían el desarrollo de métodos avanzados de diagnóstico de la causa raíz de malfuncionamiento y anomalías mediante modelos de diagnóstico. Existiría también dentro de este sistema la figura de un coordinador que realiza las tareas de gestión y coordinación entre los distintos sistemas de diagnóstico y con el resto del sistema.

• *Sistemas avanzados de evaluación temporal de la degradación y estimación de la vida residual.* Se responsabilizaría de realizar tareas de prognosis en base a los diferentes modelos y metodologías aportadas.

- *Sistemas de generación de actividades de mantenimiento.* Se encargaría de proporcionar las actividades de mantenimiento que se deberían realizar sobre los equipos monitorizados en base a los resultados de los procesos de diagnosis y prognosis.

- *Sistemas avanzados de planificación de mantenimiento.* Sería el encargado de suministrar el plan de mantenimiento óptimo de equipos, tomando como base el conjunto de actividades de mantenimiento proporcionadas por el sistema de generación de actividades de mantenimiento, los planes de mantenimiento previstos y los objetivos estratégicos definidos. Estaría compuesto por varios módulos de planificación para brindar la suficiente flexibilidad ante la introducción de nuevos métodos de planificación, la incorporación de nuevos equipos y sistemas/métodos de producción y la variación de los objetivos estratégicos.

- *Sistema de previsión de impacto de mantenimiento.* Se encargaría de predecir qué efectos tendrá una determinada planificación de actividades de mantenimiento sobre el funcionamiento conjunto de los equipos. Estaría soportado por los siguientes sistemas:

- *Sistema de estimación de costes/rendimiento del mantenimiento.* Para el análisis económico y productivo de los planes de mantenimiento cuando se aplican a los sistemas en estudio.
- *Sistemas de optimización multiobjetivo/multicriterio.* Para seleccionar los mejores planes de mantenimiento teniendo en cuenta múltiples objetivos, entre los que se encontrarían la disponibilidad y objetivos económicos. Utilizarían las estrategias evolutivas de búsqueda apropiadas para la complejidad y dimensiones de los problemas a abordar así como metodologías multiobjetivo.
- *Sistema de análisis de incertidumbre.* Se encargaría de contemplar la optimización cuando exista incertidumbre en cualquiera de los resultados y/o datos implicados en los procesos de definición de planes de mantenimiento o, en las funciones de aptitud de cualquiera de los objetivos considerados. Se utilizarían técnicas de tratamiento de incertidumbre.

- *Sistema de ayuda y/o soporte a la toma de decisiones.* Se encargaría de colaborar en la selección del plan de mantenimiento a usar en el caso de que exista más de una alternativa, normalmente suministrada por los optimizadores multiobjetivo. Se pueden considerar tres tipos de colaboración con el tomador de decisiones:

. *Ayuda a la toma de decisiones*: procedimientos que permitan reducir el número de alternativas a considerar a un número razonable de las mismas.

. *Soporte a la toma de decisiones*: favorecerá la adopción de la alternativa de mantenimiento a emplear de entre aquellas fruto del procedimiento del párrafo anterior.

. *Colaboración a la toma de decisiones*: se requerirá un sistema experto basado en reglas de negocio que asesore al tomador de decisiones en función del conocimiento implícito almacenado en el mismo.

- *Sistemas de planificación.* Se encargarían de obtener planes de mantenimiento compuestos por actividades que permitan actuar sobre el sistema en base a la prognosis realizada y encaminadas a prevenir la aparición de fallos en los diferentes equipos y sistemas considerados.

- *Sistemas de repositorio de datos:* para el almacenamiento, clasificación y consulta de la información generada por los distintos sistemas de forma coordinada y conjunta.

- *Sistema unificado de Interacción Hombre Máquina.* Conjunto de interfases que permitirían la gestión, configuración y operación de los distintos elementos del sistema de manera coordinada, unificada y ergonómica.

En la figura 89 se muestra la estructura propuesta del Sistema Global:

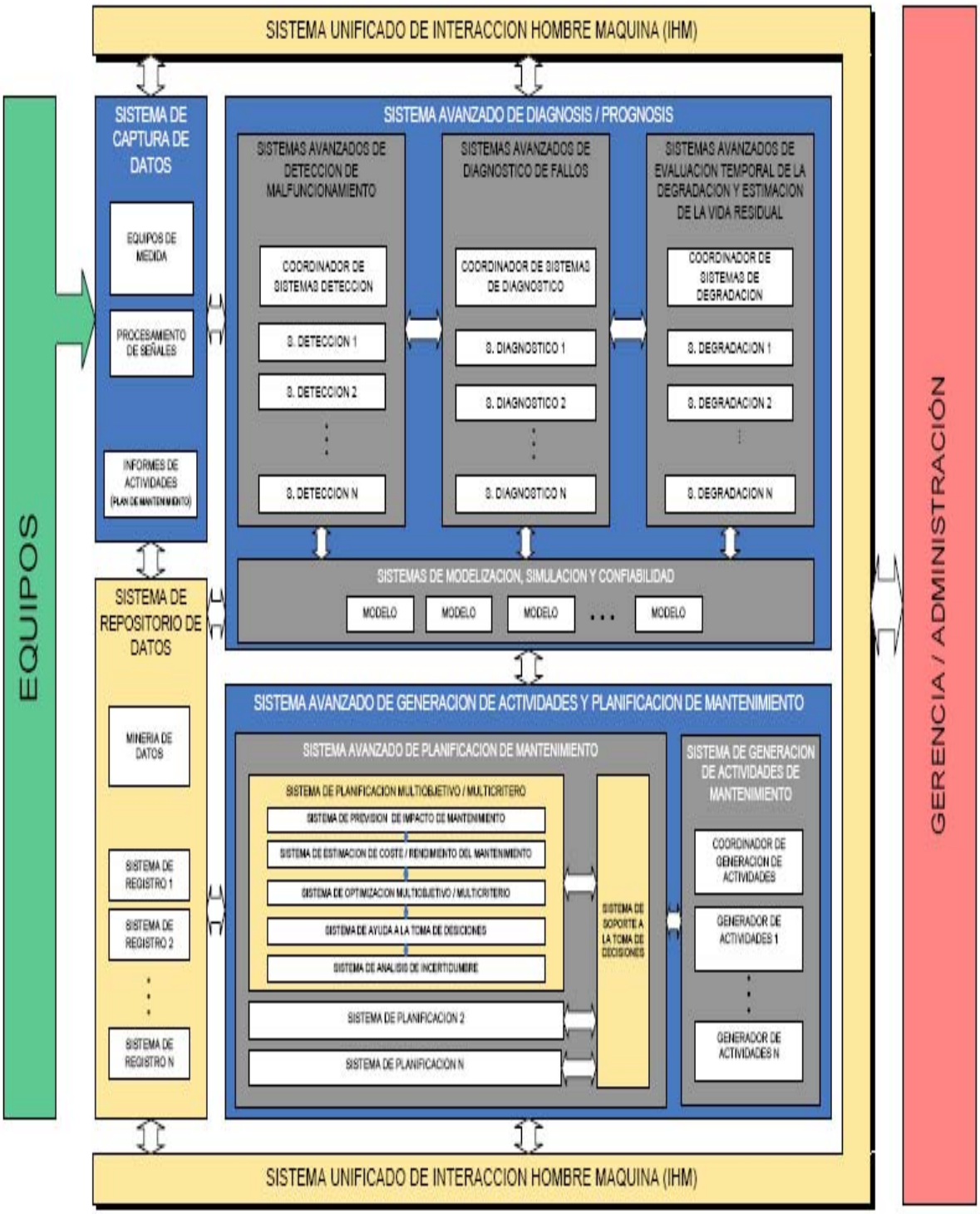


Figura 89: Estructura del Sistema Global.

- *Descripción de actividades.*

La política de mantenimiento elegida afectará al comportamiento al fallo, y por tanto, a la capacidad de producción disponible, los costes de operación y los niveles de competitividad.

Se proponen cuatro áreas de actuación (figura 90) para el desarrollo de las diferentes actuaciones técnicas necesarias para llevar a cabo el objetivo:

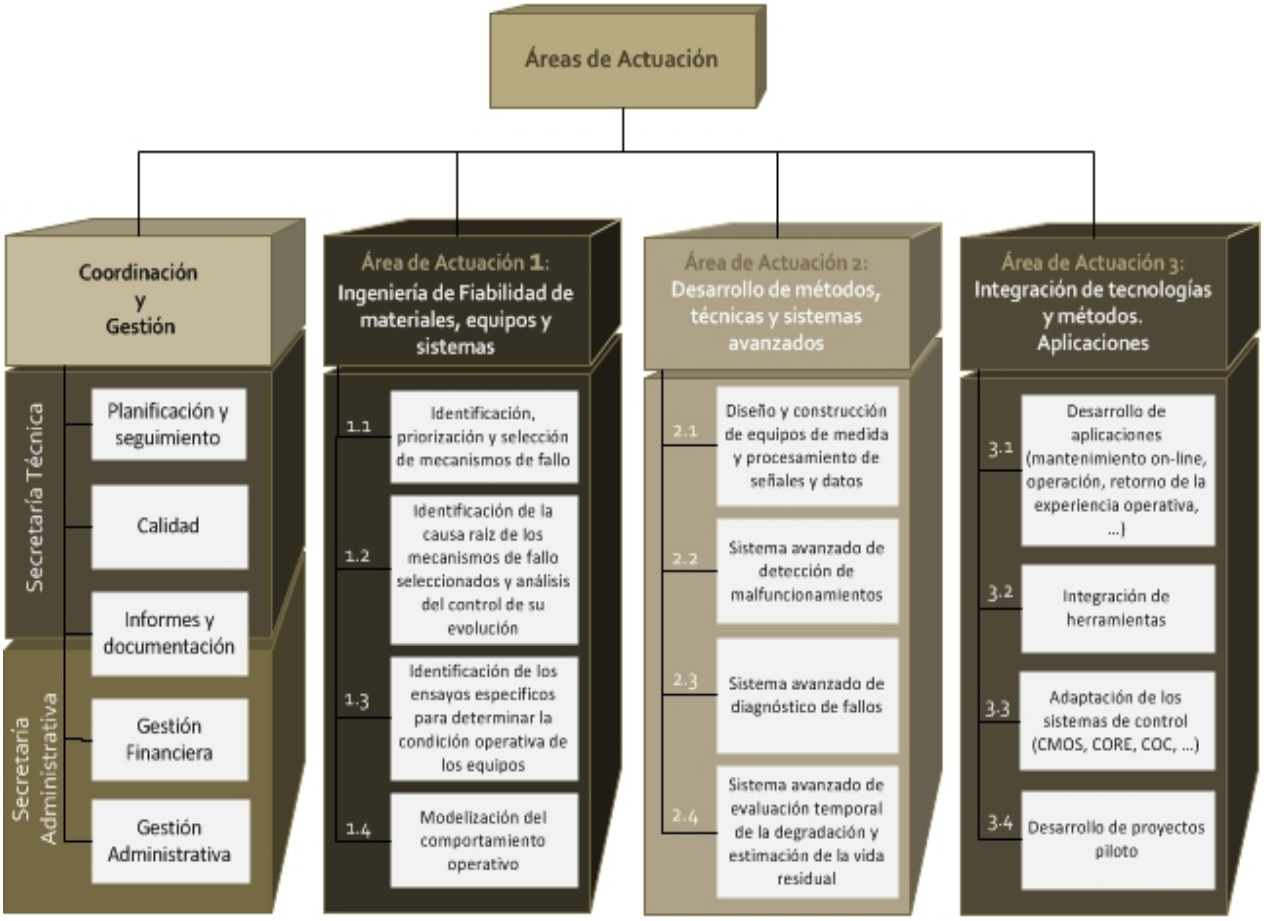


Figura 90: Áreas de actuación propuestas para el desarrollo de la plataforma científico - técnica del sistema avanzado de planificación del mantenimiento.

En el Anexo V se describen las actividades y tareas básicas, clasificadas por afinidad, para las áreas de actuación 1,2 y 3.

4. CONTRIBUCIONES.

De forma general, la función mantenimiento "hereda" un perfil de riesgo desde la fase de diseño (ingeniería) que ha de gestionar en base a las siguientes restricciones básicas: las formuladas por producción (a través de la estrategia de operación), limitaciones presupuestarias y de tiempo.

Por otra parte, el alto nivel de competitividad impuesto por las dinámicas y complejidad de los mercados actuales exige una elevada capacidad de respuesta (homeostasis). Sin embargo, las compañías afrontan severas dificultades a la hora de diseñar, rediseñar o restructurar sus plantas productivas.

Como respuesta a las dos situaciones anteriores, se proporcionan las directrices (no un análisis completo) para el diseño y desarrollo de una herramienta que brinde una información organizada del funcionamiento y ofrezca la oportunidad de controlar las dinámicas del mercado y los efectos sobre las actuaciones realizadas para facilitar el control y la gestión dinámica del ciclo de vida del sistema. Se introduce en este capítulo, como aportaciones:

• Marco de referencia para la definición y diseño de la arquitectura del sistema de información.

• Plan director para la definición y diseño de la plataforma científico-técnica del sistema de información.

• Sistema de información construido sobre tres bloques (programación, control y si - mulación) dependientes y relacionados para mejorar, de forma estructurada y base científica, el grado de competencia, en la fase de operación, de la STM+C seleccio - nada mediante la gestión de su configuración o, su reestructuración/rediseño ("nueva configuración adaptada").

El Sistema de información que se propone toma como referencia el modelo jerárquico descrito por Goldratt, E.M (1990). Está pensado para la fase de operación de la STM+C elegida y la búsqueda de respuestas, altamente optimizadas, ante estímulos externos y/o internos.

El objetivo básico es favorecer una gestión proactiva alineada con la misión, visión y objetivos de la compañía, lo que implica un enfoque amplio que integre todas las partes de la organización.

• Guía básica del equipo de gestión. Descripción de funciones y responsabilidades para la implementación del sistema (en Anexo II).

Se propone una guía básica del equipo de gestión, sus tareas y funciones. El objetivo no es establecer la estructura organizacional del sistema.

Para el diseño y éxito en la implementación de la *STM+C* resulta necesario que, a nivel organizativo, se realice la asignación de ciertas funciones, tareas y responsa - bilidades. Esta fase es crítica para el S.I., pues la persona (trabajador o equipo) re - presenta la fuente principal de la que se extrae la información; constituye una pieza esencial para el éxito en la implementación y la consecución de los resultados. La cuestión básica a resolver es la planificación de los recursos necesarios, especial - mente humanos *("Guías de Planificación")* para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

• Proceso de decisión multietapa y plataforma científico-técnica para el control y la gestión dinámica de la O&M. Marco de referencia para la "Homeostasis Artificial del Sistema". Método faro.

Se propone una *Estructura de Control Dinámica* de apoyo a la toma de decisio - nes que permita la coevolución de los índices de desempeño-performance (IP´s) del sistema con los cambios asociados a factores, tanto internos como externos (*Cons - trucción del" fenotipo optimizado" del sistema).*

La plataforma permitirá integrar conocimiento e información sobre diagnóstico y mantenimiento de equipos y sistemas, que hoy por hoy, no están relacionados. Permitirá una explotación integral en base al conocimiento incluido en diversas fuentes y optimizar la explotación multicriterio de equipos (RAMS, costes del ciclo de vida, plan de negocio).

Se propone un modelo para migrar de la "situación actual" a la "situación óptima" mediante aprendizaje evolutivo. El objetivo es mejorar el nivel de competencia de la STM+C seleccionada mediante su adaptación o reestructuración.

Se presenta, igualmente, la infraestructura de apoyo para el desarrollo de esta etapa, las bases para su despliegue y la operativa para la implantación de la solución.

• Directrices para desarrollar un *Sistema de Información para la Gestión del Funcionamiento en Mantenimiento (SIG-FM).*

Se establecen las bases para la definición de un sistema más estructurado e integrado de lo que se conoce actualmente a través de la literatura, que cumpla con dos propósitos básicos:

c) Servir como herramienta para el equipo gestor (nivel operativo) para apoyar la toma de decisiones para reducir los costes integrales del mantenimiento.

d) Actuar como vehículo para la investigación en la toma de decisiones a nivel táctico y estratégico. Esto representa un reto a la hora de ayudar a predecir el impacto que determinadas acciones u omisiones (decisiones) adoptadas en, o sobre, mantenimiento, pueden tener en otras áreas del sistema.

El objetivo es valorar las diferentes alternativas posibilitando el cálculo estimado de los retornos potenciales. También resulta interesante para los programas de mejora continua.

A un nivel más avanzado, se podría plantear la integración del sistema en un DSS con objeto de ayudar a seleccionar la solución más apropiada para el área donde el problema fue detectado.

Una de las metas del sistema sería transformar la abundancia de datos, a menudo encontrados en la práctica, en información seleccionada y útil para la gestión.

• Descripción de las actividades y tareas básicas, clasificadas por afinidad y centradas en los aspectos científico-técnicos, asociadas a la arquitectura modular de la estructura de control (en Anexo V).

• Integración de la función mantenimiento con las funciones principales de negocio con objeto de obtener "óptimos globales dinámicos" a nivel organizativo.

En este trabajo de investigación se enfoca el mantenimiento como una función de negocio; como tal función, se propone priorizar las actividades en términos de ROI (ROI_M), aspecto que es ignorado en la literatura académica sobre mantenimiento (Tam, A.S.B. & Price, J.W.H., 2008b).

• Un punto de vista práctico orientado a la mejora y la toma de decisiones para la gestión del mantenimiento.

• Una visión del mantenimiento más amplia, no sólo desde el punto de vista del gasto que supone a nivel contable, sino también por los riesgos que minimiza y los beneficios ocultos que implica una correcta planificación, programación y ejecución.

• Gestión más científica (a nivel estratégico, táctico y operativo), que permita el "remplazo" de decisiones soportadas por criterios subjetivos por decisiones más objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos.

CAPÍTULO V

APLICACIONES.

CAPÍTULO V: APLICACIONES.

En este capítulo se presentan tres casos reales de contratos integrados para proveer una descripción detallada sobre la implementación de la metodología e ilustrar los resultados.

En los nuevos *contratos integrados* (D&C -Design & Construct , DBM-Design & Built & Maintain y DBFM-Design, Build, Finance and Maintain), el mantenimiento se convierte en responsabilidad del contratista y el consumidor o el usuario es el productor, por lo que es importante, en la fase de diseño de los proyectos, un enfoque integrado de aspectos como la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS), los cuales dependen de la idea del ciclo de vida del sistema.

En este tipo de contratos (carreteras, parques eólicos, contratos de Defensa, proyectos ferroviarios, etc.) los clientes suministran pocas especificaciones al diseño del proyecto para permitir al contratista la libertad de innovar y elegir el diseño adecuado que satisfaga las "Especificaciones de Funcionamiento" (functional per - formance requirements: nivel de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, seguridad, constructabilidad, estabilidad, impacto medio ambiental, riesgo, etc.).

Como contrapartida, el acento se suele poner sobre las "garantías de desempe - ño/funcionamiento", entorno a las cuales se definen las condiciones del contrato.

En este contexto es necesario, en la fase de diseño, rigor y una orientación hacia la gestión del ciclo de vida del sistema, en base al interés y objetivos del cliente. Por tanto, resulta fundamental que el analista (contratista) disponga de una metodología que le permita investigar e innovar sobre diferentes alternativas de diseño para seleccionar la configuración STM+C óptima, en base al mejor equilibrio entre los requerimientos asociados a la "componente de valor" y la "componente de coste total", sobre el ciclo de vida establecido.

CASO 1: PROYECTO DE AUTOPISTA DE NUEVO TRAZADO EN RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN INDIRECTA. DISEÑO, CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE LA STM+C DEL "SUBSISTEMA FIRME Y PAVIMENTACIÓN".

El caso adoptado es un contrato DBM de infraestructura de una empresa de in - geniería holandesa llamada Breijn (filial de la empresa constructora Heijmans N.V.). Fue utilizado por Breemer, J.J.A. (2009) para examinar el modelo de Ogink, G. Al-Jibouri.

Se trata de un *contrato integrado* que implica obligaciones de mantenimiento para el que se investigan diferentes alternativas de diseño para encontrar el mejor equilibrio entre CAPEX, OPEX, desempeño y la estrategia de mantenimiento, para el ciclo de vida establecido.

El proyecto está relacionado con el rediseño, reconstrucción y mantenimiento de la carretera N-302 (carretera provincial más larga de Holanda).

Breijn fue la ingeniería responsable del diseño. La obligación de la parte con - tratante fue diseñar, construir y mantener la carretera durante un período de 15 años (y una vida residual mínima de 5 años). Durante el período de mantenimiento, las garantías de desempeño (performance) establecidas fueron:

1. Fiabilidad del pavimento de la carretera: 99, 8%.
2. Disponibilidad del pavimento de la carretera: 99, 8%.
3. Downtime menor de 350 horas.

El contrato estipulaba que el incumplimiento de las garantías suponía una penalización en el pago (penaltis). Para la fase de diseño preliminar se consideraron varias alternativas para el *subsistema pavimento* basándose en el concepto LCC.

RAMS y LCC se proponen específicamente para evaluar las alternativas de diseño en base al desempeño y los costes, con la consideración de las necesidades del cliente (es decir, requisitos obligatorios y trade-off).

Se compara y discute, en este caso, el resultado del proceso de selección de la mejor alternativa con el resultado cuando se consideran las garantías de desempeño (performance) en el modelo. En enfoque propuesto, las compensaciones son consideradas como dato en el proceso de decisión a través del factor de *"sostenibilidad social"*.

1. PREMISAS DEL ANÁLISIS.

En el contexto de un contrato DBM (*contrato integrado),* el mantenimiento se ha convertido en responsabilidad del contratista, por lo que es importante, en la fase de diseño de los proyectos, un enfoque integrado de aspectos como la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS), los cuales dependen de la idea del ciclo de vida del sistema.

En este tipo de contratos es necesario un diseño riguroso y una orientación hacia la gestión del ciclo de vida del sistema, en base al interés y objetivos del cliente.

Las Especificaciones de funcionamiento (functional performance) se seleccionan en base a la naturaleza del sistema.

Las *garantías de desempeño* son los niveles mínimos de los requisitos establecidos en las Especificaciones de Funcionamiento ("*functional performance")* exigidos a la STM seleccionada. Su traducción (traslación) en términos económicos se realiza a través de las *"fórmulas de compensación"* (modelo matemático para cuantificar los costes/beneficios diferidos de una STM). Se considera su análisis muy importante, en las fases de oferta y adjudicación, para crear un incentivo financiero en el contratista que le motive a aumentar los niveles de alguna, o todas, las Especificaciones de Funcionamiento (*"functional performance")* exigidas a la STM

(factores de RAMS, otras) y a la reducción de los efectos diferidos (económicos, medioambientales, accidentes, etc.) asociados a errores en el diseño o la toma de decisiones, en la fase de adquisición.

El proceso de decisión (figura 57, capítulo III del trabajo de tesis) se centra en el ciclo de vida del sistema en la fase de diseño en base a los objetivos e intereses del cliente (trade-off requirements).

LCC y RAMS son los métodos utilizados para cuantificar el desempeño (performance) y las diferentes categorías de costes (CAPEX *(Capital Expenditure)*, OPEX *(Operation Expenditure)* y RDC *(Risk Dimension Cost)*).

En la *fase de Diseño Definitivo* es donde se definen las *garantías de desempeño y las ecuaciones de compensación* a través de la información de los modos de fallo, y sus consecuencias, y una buena comprensión de la relación coste de la dimensión riesgo (*RDC*) vs. coste de los recursos (Re*DC*), para cada alternativa.

El resultado es un informe detallado de alternativas coste efectivas (alternativas STM+C) el cual incluye información técnica, de O&M*(Opertaion & Maintenance)*, de estructura de costes y coste total, para cada alternativa.

La aplicación de RAMS y sus técnicas es reciente en las industria de la construcción, por lo que no existe un gran conocimiento y experiencia en su aplicación en este sector (Ogink, G., & Al-Jibouri, S., 2008)**.** Ello viene justificado, principalmente, por el hecho de que en esta industria la ingeniería de sistemas no ha sido el modelo utilizado para definir sus procesos.

2. FUNDAMENTOS PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA DE ALTERNATIVAS. FACTORES DE DISEÑO.

Un proyecto de carretera es un proyecto complejo en el que hay que considerar diferentes subsistemas y componentes en la fase de diseño: trazado, firme y pavimento, equipamiento vial (señalización vertical, horizontal, elementos de balizamiento, sistema de contención de vehículos, etc.), áreas de servicios, instalaciones (iluminación, drenaje, etc.), otras. Un subsistema crítico dentro del sistema es el *subsistema firme y pavimento*. En el proceso de toma de decisiones para el diseño, configuración y selección, el analista ha de tratar con un problema MCDM *(Multiple criteria decision – making)* complejo con múltiples variables, múltiples restricciones y con objetivos normalmente en conflicto. Es un problema de ingeniería de optimización multiobjetivo (POM*)*, en el que la toma de decisiones informada, en el nivel 1, es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos en un entorno complejo y de alta competitividad como el actual; esto hace el caso seleccionado apropiado para aplicar la metodología propuesta en el capítulo III de este trabajo de tesis.

2.1. Firme y pavimento. Definición y conceptos básicos.

Es necesario diferenciar el “firme” del “pavimento”. El firme es el conjunto de capas (incluida la explanada o “cimiento” del firme) que constituyen toda la sección estructural; mientras que el pavimento, es únicamente la capa superior cuya “cara vista”es una superficie que se denomina *rodadura.*

Las diferentes capas que componen el firme son las siguientes:

• *Pavimento o capa de rodadura:* es la capa superior del firme, la cual debe resistir los esfuerzos producidos por el tráfico, proporcionando a su vez al firme una capa de rodadura adecuada.

• *Base:* es la capa que soporta al pavimento, siendo su función fundamentalmente resistente.

• *Sub-base:* es el cimiento del firme que complementa la función resistente de las capas superiores.
• *Explanada:* es la superficie del terreno convenientemente tratada y allanada sobre la que se asienta el firme, aspecto que condiciona las características de duración y resistencia del mismo. La ejecución de la explanada será necesaria en los casos de caminos de nueva traza, en aquellos que necesitan la ampliación de la plataforma en la cual se apoyarán, o en aquellos en los que su estado sea notablemente deficiente y sea precisa una mejora de la misma.

El firme constituye una de las partes más importantes de la ingeniería de carreteras (superestructura de una carretera) tanto desde el punto de vista técnico (en el proyecto, construcción y conservación) como económico y de valoración de los usuarios (mayoritariamente califican a la carretera por el estado del firme).

Los firmes cumplen las siguientes funciones:
• Proporcionar una superficie de tránsito/rodadura segura, cómoda y de característi - cas permanentes bajo las cargas repetidas del tráfico durante un periodo suficien - temente largo de tiempo (vida útil o periodo de proyecto).
• Resistir las solicitaciones previstas del tráfico (de personas/animales/vehículos), repartiendo las presiones verticales ejercidas por la cargas, de forma que a la explanada sólo llegue una pequeña fracción de aquellas compatibles en todo caso con su capacidad de soporte.
• Proteger la explanada de la intemperie, y en particular, de la acción del agua, con su incidencia en la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos. En climas muy fríos, el firme constituye, además, una protección contra los efectos de la helada y el deshielo.

En el diseño y proyecto de un firme es habitual distinguir dos aspectos fundamentales: la calidad estructural y la calidad funcional.

La *calidad estructural*, como su propio nombre indica, se refiere a la capacidad del firme, considerado como una "estructura", de soportar las solicitaciones durante la vida de proyecto sin necesidad de llevar a cabo medidas de rehabilitación estructural. Vendrá definida por los materiales y los espesores de las capas utilizadas en su diseño, configuración y construcción.

Desde el punto de vista estructural, el planteamiento debe seguir la filosofía de los estados límites, en el que se cumpla que *Solicitación (S)* $\leq$ *Respuesta (R).* Entre las solicitaciones (S) se consideran, principalmente, las originadas por las cargas de tráfico y las deformaciones impuestas de tipo térmico o reológico. En el caso de pa - vimentos de hormigón pretensado, debería incluirse la acción del pretensado.

Para conocer la respuesta (R), no solo hay que conocer las características de los materiales a emplear, pensando en el análisis seccional, sino también de las condicio- nes de apoyo, pensando en el análisis estructural; en definitiva, se requiere conocer las características de la explanada. En ese contexto, cabe matizar que el fallo de los pavimentos muchas veces se produce a raíz de solicitaciones que presentan una variación cíclica capaz de causar su fatiga en el tiempo, a pesar de no superar, de forma instantánea, la capacidad resistente del material.

La *calidad funcional* afecta a las características superficiales del *pavimento*, que es la parte del firme que está en contacto con los vehículos y que se conoce también con el nombre de capa de rodadura.

Desde el punto de vista general, la rodadura debe ser cómoda, segura, duradera, poco ruidosa, producir un desgaste mínimo en los vehículos y debe facilitar la

evacuación del agua (cuando existe) en la zona de contacto con el neumático. La geometría del pavimento afecta a la seguridad, comodidad y costes de los usuarios.

La *textura del pavimento* es un parámetro crítico para la comodidad y la seguridad de los usuarios necesario para la conservación de las carreteras. La textura influye:

• Directamente, en la capacidad del pavimento para evacuar el agua de la interfase neumático - pavimento.

• De forma indirecta, en el valor del coeficiente de rozamiento del pavimento, que tiene gran importancia para la adecuada adherencia entre neumático y pavimento.

• Es la característica determinante en el nivel de ruido del tráfico, tanto del que perciben los ocupantes de los vehículos como el ruido de entorno que condiciona la calidad de vida de las zonas colindantes.

• En el aspecto económico, en el consumo de gasolina, en el deterioro de los vehículos y sobre todo en el desgaste de los neumáticos.

Dentro de la textura se suele distinguir entre *microtextura* (irregularidades superficiales del pavimento menores de 0.5 mm), *la macrotextura* (de 0.5 a 50 mm) y la *megatextura* (de 50 a 500 mm). La primera se utiliza para definir la aspereza del pavimento; la segunda su rugosidad; y la tercera está asociada con los baches y peladuras del firme.

Para un correcto diseño y dimensionamiento estructural es necesario tener presente los aspectos funcionales. El comportamiento estructural del firme y su resistencia al proceso de deterioro dependen de los materiales que lo configuran y de su modo y mecanismos de deterioro. Los métodos de dimensionamiento de firmes estudian y analizan los mecanismos de fallo para definir y seleccionar los materiales y espesores adecuados para mejorar el LCC del susbsistema.

El proceso de dimensionamiento consiste en un cálculo del estado tenso - defor–macional de las capas del firme que induce el paso de una carga patrón y un cálculo a fatiga de las diferentes capas en función de las tensiones o deformaciones inducidas por el paso de la carga.

Recomendaciones sobre número y espesor mínimo de capas en las secciones de firmes están presentes en diversas normas internacionales.

2.2. Factores para el diseño, configuración y cálculo de firmes. Considera - ciones generales.

Para definir las características geométricas y mecánicas de las diversas capas (elección de la sección de un firme y su explanación), así como de su proceso constructivo, deberá tenerse en consideración aspectos estructurales (dimensiona - miento), funcionales, sociales, ambientales, constructivos y económicos. Se trata pues de un problema MCDM complejo.

Para la *elección del firme* hay que tener en cuenta los siguientes factores básicos:

• *Periodo de proyecto.* El valor del periodo de proyecto (intervalo de tiempo durante el cual la estructura de firme va a permanecer en estado de servicio sin necesidad de actuaciones de rehabilitación importantes) no viene definido en la Norma 6.1 IC, si bien, desde 1.975, habitualmente se han venido adoptando 20 años para los firmes flexibles, semiflexibles y semirrígidos; y 30 años, para los firmes con pavimento de hormigón.

• *Tipo de uso* (peatonal, peatonal-ciclista, peatonal-ciclista y a caballo, vehículos de mantenimiento, vehículos autorizados, etc.). Deben tenerse en cuenta las cargas esperadas durante la vida útil de la infraestructura. Del mismo modo, se deben

considerar aspectos como la utilización de la vía por bicicletas, para definir en proyecto una superficie de rodadura de cierta adherencia y regularidad.

• *Categoría del tráfico e intensidad media diaria.* La variable habitualmente empleada para estudiar el tráfico que soporta un firme es la intensidad media de vehículos pesados en el carril de proyecto y en el año de apertura al tráfico (IMDP).

• *Normativa o directrices ambientales.* Deben incorporarse al proyecto los requisitos que señalen las disposiciones administrativas referidas a aspectos ambientales (tanto específicos, si discurren por espacios naturales, como generales, aplicables al resto de ámbitos). Se deberán estudiar ambientalmente las zonas de préstamo y vertedero.

• *Climatología.* El clima es un agente que modifica las propiedades, y por tanto, el comportamiento de los materiales que componen el firme. A efectos de proyecto, el clima se tiene en cuenta en la elección de los materiales a emplear en las capas de firme (tipo de betún asfáltico, relación polvo mineral/betún, etc.), así como en otros elementos constructivos como son los dispositivos de drenaje.

Deben ser objeto de consideración las temperaturas extremas diarias y esta - cionales, la radiación solar, el régimen y la cuantía de las precipitaciones, la posible presencia de hielo y nieve sobre la superficie, etc.

• *Capas subyacentes.* Se debe tener en cuenta si se dispone de explanación construida, base/sub-base y firme preexistente.

• *Materiales disponibles.* Son determinantes para una adecuada selección de la estructura del firme (tanto a nivel técnico como económico). Por una parte, se debe considerar la disponibilidad de áridos en los yacimientos y canteras de la zona. Además de la calidad requerida (depende tanto de la naturaleza de los áridos como de los tratamientos a los que se someten), hay que considerar las cantidades disponibles, el suministro y el precio (condicionado en gran medida por la distancia de transporte).

• *Capacidad portante y resistencia a la deformación.* Hay que tener en cuenta la sensibilidad de los firmes a la humedad, tanto en lo que se refiere a su resistencia, como a las eventuales variaciones de volumen (hinchamiento o retracción). En climas muy fríos se debe prestar atención, a demás, a los fenómenos de helada y deshielo.

• *Diferenciación visual del firme.* Se relaciona con el color de la vía y de su textura superficial; es importante en caso de existencia de vía ciclable.

• *Costes.* Para la elección del tipo de firme deberán compararse no sólo los costes iniciales de construcción de las distintas opciones consideradas, sino también los costes globales, que incluirán los de conservación y rehabilitación.

• *Otros factores.* Otros factores que afectan de manera importante al proyecto de un firme son los relacionados con el entorno (medioambiente, ruido, limpieza, estética), las dimensiones de la obra, y ciertas medidas de política general o local (promover la competencia empresarial, etc.).

El proyecto constructivo debe obtenerse a partir de la consideración de los factores mencionados mediante la concreción de:

• *Sección de la explanada y firme.* Espesores de las diferentes capas y materiales.

Las explanadas se clasifican en tres categorías (E1, E2,E3) en función de los va - lores del módulo de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga del ensa yo de carga con placa (NLT- 357/98).

• *Procedimiento constructivo.* El tipo de pavimento empleado influye en aspectos relacionados con su conservación y mantenimiento, como son:

- Deterioro y fisuración en superficie. Ciertos firmes retrasan la aparición de los fenómenos mencionados.
- Presencia de bordillos laterales que evitan la degradación de los bordes, la invasión por la vegetación y facilitan la ejecución de la obra.
- Facilidad de la limpieza.
- Durabilidad de la señalización horizontal.

Los ensayos y estudios previos (ensayos geotécnicos) necesarios para la elección de firmes y pavimentos serán los relativos a la determinación de la capacidad portante del suelo (plataforma) y la posible agresividad de los mismos ante solu - ciones hormigonadas. Deben tenerse en cuenta, al menos, los siguientes y sus normas de referencia:

1. Asociados a la caracterización del suelo y determinación de la capacidad portante:

• Preparación de muestras para los ensayos de suelos (NLT- 101/72).
• Análisis granulométrico (UNE 1030101).
• Límite líquido e índice de plasticidad (UNE 103103 y UNE 103104, respectiva - mente).
• Límites de Atterberg (UNE 103203/4/94).
• Ensayo de compactación Proctor Modificado (UNE 103501).
• Determinación del CBR (NTL- 111/87).
• Materia orgánica (UNE 103204/93).
• Placa de carga (NLT-357:1998).
• Hinchamiento (UNE 103601).
• Ensayo de Colapso en suelos (NLT-254).

2. Asociados a la determinación de la agresividad:

• Sales solubles (NLT 114).
• Contenido en sulfatos (NLT-1 15/99).

Los cálculos van asociados a la obtención de la capacidad portante del terreno. La repetición de las cargas y la acumulación de sus efectos sobre el firme (fatiga) son fundamentales para el cálculo. Además, hay que tener en cuenta las máximas presiones de contacto, las solicitaciones tangenciales en ciertas zonas especiales, como las curvas, y las velocidades de aplicación. Una consideración especial merece el tráfico de obra para que no deteriore las capas del firme durante la ejecución.

Para dimensionar un firme hay que analizar dos aspectos fundamentales:

- Las características del terreno.
- Las características del tráfico.

Las características del terreno vendrán definidas, fundamentalmente, por su Indice CBR, y por su grado de compactación Proctor. Las características del tráfico vendrán determinadas por la Intensidad Media Diaria de Vehículos pesados (lMDp).

La normativa para realizar el cálculo del espesor de la capa de firme se fundamenta, por un lado, en la normativa de Carreteras (*Instrucción de Carreteras; norma 6.1 I-C "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras, aprobada por orden FOM 3460/2003, de 28 de noviembre*), que indica que dicho espesor se debe calcular en función del tráfico esperado durante la vida útil del camino a proyectar ;y, por otro, en el Ábaco de Peltier, que basa el espesor del firme en el CBR de la explanación y la intensidad del tráfico.

Los cálculos necesarios para la obtención de espesores y dosificaciones de las distintas capas estructurales del firme puede consultarse en Kraemer, C., Albeada, R. (2004) y Osteret, J .F., Olivares Santiago, M. (1994).

El proyecto debe definir la serie de firmes y pavimentos a instalar a lo largo del trazado.

2.3. Tipos de firmes y modos de deterioro. Comportamiento estructural.

El firme de una carretera puede estar compuesto por materiales diferentes. Se pueden agrupar por su comportamiento y respuesta en cuatro tipologías de firmes:

- *Firmes flexibles (base granular).*

Los que se deforman bajo la acción de las cargas del tráfico recuperándose una vez que la carga ha desaparecido. Se caracterizan por estar constituidas sus capas de base y de sub-base por un material granular y estar recubiertos por un tratamiento superficial o una capa de mezcla bituminosa de espesor inferior a 15 cm.

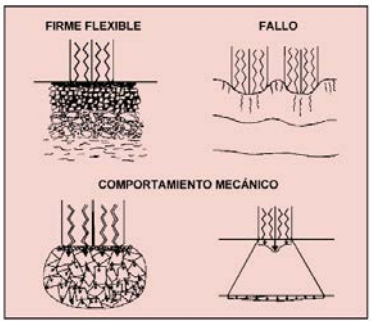


Figura 91: Firmes flexibles (base granular) [Alarcón Ibarra, J. (2003)].

Las capas granulares son las que soportan las solicitaciones normales del tráfico. Son firmes cuyas capas granulares se caracterizan de abajo a arriba por una capacidad soporte creciente y una permeabilidad decreciente. La capa de rodadura sirve para impermeabilizar, soportar los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar confort y seguridad.

El modo de producirse el fallo es por deformaciones excesivas. También puede producirse el fallo estructural por fisuración por fatiga de su capa de rodadura.

En este tipo de firmes también se manifiestan otros fallos, localizados en su superficie, debidos principalmente: a la acción abrasiva del tráfico; a la acción destructiva y de envejecimiento de los agentes atmosféricos; al empleo de materiales inadecuados; a una mala ejecución.

- *Firmes semirígidos (base tratada con ligantes hidraúlicos).*

Se diferencia de los otros por una mayor rigidez de las capas que lo componen, en particular, de la capa base. Esta capa está formada por una base granular tratada con un ligante hidráulico o puzolánico. El pavimento está constituido por una o dos capas de mezcla bituminosa (rodadura e intermedia). La sub-base suele ser un material granular normalmente estabilizado.

En este tipo de firmes es fundamental la capa de base. Debido a su mayor rigidez absorbe la mayor parte de los esfuerzos verticales que llegan a la explanada muy amortiguados.

El mecanismo de deterioro que produce el fallo son los esfuerzos de flexotracción a los que está sometida la capa base que por fatiga produce su fisuración.

En este tipo de firmes cabe destacar que pequeñas variaciones en el espesor de la capa base producen fuertes variaciones en la vida del firme.

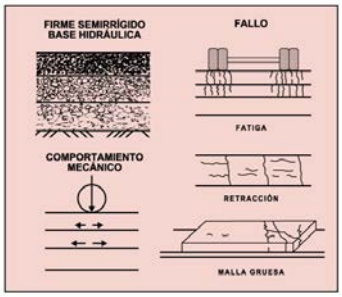


Figura 92: Firmes semirígidos (base tratada con ligantes hidraúlicos) [Alarcón Ibarra, J. (2003)].

Un tipo de fallo estructural que suele producirse es el de fisura en malla gruesa de la capa de rodadura con surgencia de lechada; se asocia con la falta de cohesión del material tratado debido a una mala calidad en el material de la capa base o una puesta en obra defectuosa, con lo que no se adquiere la suficiente cohesión y se comporta como un material granular.

La pérdida de adherencia de las capas de mezcla bituminosa respecto a la base tratada puede ser causa de deterioro y ruina del firme (aparición de baches, fisuras, desprendimientos). Este fallo puede estar asociado, básicamente, a un espesor insufi - ciente en las capas de pavimento, una mala adherencia base-pavimento en la fase de ejecución, o al empleo de pavimentos permeables que facilitan el acceso de agua a la zona de contacto base-pavimento.

En su deterioro superficial aparecen los mismos fallos que en los dos casos anteriores. En este tipo de firmes hay que señalar la aparición, con gran profusión, de fisuras transversales en la capa de rodadura propagadas por la capa base.

- *Firmes rígidos (pavimento de hormigón).*

No se dejan deformar; son aquellos cuyo pavimento es de hormigón.

Un pavimento de hormigón está constituido por una losa de hormigón que puede ser colocada directamente sobre la explanada o bien intercalando una capa soporte que puede o no estar tratada. La losa de hormigón actúa al mismo tiempo como capa de rodadura y como capa base. La capa soporte no tiene un fin estructural sino el de proporcionar una superficie de apoyo adecuada a la losa de hormigón y facilitar su construcción. Dentro de los pavimentos de hormigón se distinguen:

- *Pavimentos de hormigón de losas cortas, 3-5 m, en hormigón en masa y juntas con o sin pasadores.*
- *Pavimentos de hormigón de losas largas de hormigón armado y juntas con pasadores.*
- *Pavimentos de hormigón armado continuo.*
- *Pavimentos de hormigón pretensado.*

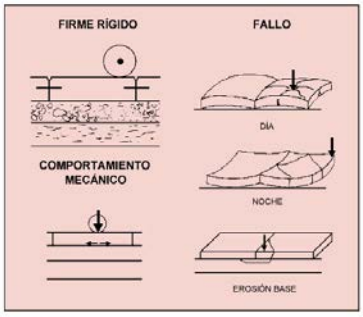


Figura 93: Firmes rígidos [Alarcón Ibarra, J. (2003)].

El fallo estructural es por fisuración por fatiga. Sin embargo, no es su fallo más frecuente; suelen ser superficiales y afectan a la calidad de la rodadura.

En los pavimentos de hormigón armado continuos, salvo problemas de mala ejecución, la mayor parte de los defectos comunes para este tipo de firmes no se detectan.

Cada uno de estos tipos de firmes presenta unas propiedades funcionales y un comportamiento ante los agentes de deterioro diferentes; este comportamiento ha de ser tenido en cuenta, tanto en su diseño (estructural y funcional), como en su mante - nimiento y rehabilitación.

El desempeño del pavimento con respecto a la estabilidad, la capacidad portante y la consolidación con el paso del tiempo depende, en gran medida, de la explanada en la que se asienta la estructura. Al contrario de los pavimentos flexibles, los pavimentos bicapa de hormigón permiten una distribución más uniforme de las cargas en la explanada, la cual pasa a afectar menos el comportamiento de la estructura. Por consiguiente, se reduce la necesidad de emplear bases o capas intermedias con materiales muy rígidos o estabilizar la explanada, con excepción de sitios expuestos a cargas muy elevadas.

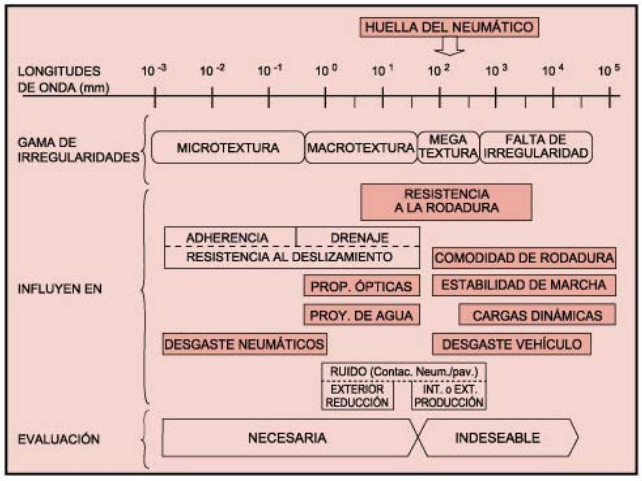
2.4. Consideraciones funcionales.

Las cualidades funcionales del firme residen fundamentalmente en su superficie; están principalmente relacionadas con la textura y la regularidad superficial del pavimento. De su acabado y de los materiales empleados en su construcción dependen aspectos tales como:

- La adherencia del neumático.
- Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- El desgaste de los neumáticos.
- El ruido en el interior y exterior del vehículo.
- La comodidad y estabilidad en marcha.
- Las cargas dinámicas del tráfico.
- La resistencia a la rodadura (consumo de combustible).
- El envejecimiento de los vehículos.
- Las propiedades ópticas.

La tabla 16 muestra la incidencia de cada uno de estos factores sobre las cuali - dades del firme:

Tabla 16: Efectos de las características superficiales sobre las cualidades funcionales de los firmes. [Alarcón Ibarra, J. (2003)]



La irregularidad superficial está asociada con longitudes de onda mayores de 0.5m.Como se observa en la tabla, la microtextura (aspereza del pavimento) es necesaria para una buena adherencia; la macrotextura, para conseguir mantener la adherencia a altas velocidades o con pavimento mojado, mejorar la visibilidad con pavimento mojado de la señalización horizontal; la megatextura y la falta de regula - ridad superficial resultan negativas para la comodidad, el nivel de ruido, los gastos de mantenimiento y conservación de la vía y los vehículos, la seguridad, etc.

Las especificaciones sobre regularidad están fijadas por norma (Pliego General de Carreteras: PG-3) para cada unidad de obra.

3. APLICACIÓN DEL MÉTODO I+I+D PARA LA DEFINICIÓN, CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DEL SUBSISTEMA FIRME Y PAVIMENTO.

El caso es usado para examinar la implementación del método en el proceso de diseño y selección de la mejor alternativa para el subsistema pavimentación. Por tal motivo, se centra el desarrollo del caso en la fase 2 *(Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas).*

En el proceso de análisis de los resultados hay que tener en cuenta dos aspectos:

• Los estándares en Holanda para los firmes y pavimentos en carreteras son muy altos, y los diseñadores amplían el espesor de las capas para garantizar una alta fiabilidad.

• En este caso se analiza sólo el subsistema firme y pavimento, por lo que es probable que el desempeño (performance) del sistema en su conjunto sea menor en función del peso del resto de los subsistemas sobre el desempeño del sistema técnico global.

Hay básicamente dos tipos de entradas que influyen en los trade-off: las que especifican las condiciones necesarias y suficientes que han de satisfacer la solución para que sea aceptada por el cliente (mandatory); y las que hacen al cliente sentirse más satisfecho (trade-off requirements).

La atención se centra en la minimización del downtime (factor de coste signifi - cativo en las industrias, y de forma especial, en las de proceso continuo) y la maximización de la “disponibilidad técnica” debido a su influencia positiva y directa sobre los ingresos y el beneficio.

Los objetivos básicos son:

• Generar información sobre el nivel de disponibilidad, política de mantenimiento, riesgo específico, costes diferidos (factor de sostenibilidad económica) y coste total.

• Asegurar el máximo MII bajo las restricciones contempladas. Por tanto, es impor - tante una buena comprensión de la relación RDC vs. Re*DC*, para cada alternativa. La idea subyacente es intensificar los conceptos de “mantenimiento planificado” y “mantenimiento efectivo” (Conde Collado, J., et al., 2003) con el objetivo de reducir el coste potencial asociado al downtime (coste social de no disponibilidad).

Se comparan y discuten los resultados del proceso de selección de la mejor alternativa con el resultado cuando las garantías de desempeño son introducidas en el análisis; se demuestra que en sistemas técnicos de producción continua e intensivos en capital, las garantías de desempeño (y sus ecuaciones de compensación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa. Por tanto, se consideran un elemento clave que debe ser tenido en consideración en el proceso de selección de la mejor alternativa.

3.0. Benchmarking: Etapa de Investigación (I).

Con objeto de que la STM propuesta cumpla con las funciones (a nivel técnico y económico) que se le exigirá a largo del ciclo de vida, es necesario realizar un análisis riguroso y completo del subsistema técnico a diseñar para determinar y conocer los principios de funcionamiento, identificar las categorías y la estructura de costes significativos, la/s causa raíz de los modos críticos de fallos potenciales, etc.

La adopción, de forma conveniente, de las mejores prácticas, ayudará a construir diseños adaptados, más confiables, de mejor calidad y más coste efectivos en O&M.

La finalidad de las conclusiones recogidas en este apartado es servir de base para el debate y la discusión a nivel técnico del diseño de las alternativas.

En el último siglo tres han sido las tendencias básicas para resolver, desde un punto de vista técnico, el subsistema firme y pavimento de un proyecto de carreteras:

- *firmes flexibles* formados por distintas capas, de rigidez decreciente en pro - fundidad, tomando como ligante los materiales bituminosos.
- *Firmes semirígidos* constituidos por capas tratadas o estabilizadas con ce - mento.
- *Firmes rígidos,* basados principalmente en soluciones de losas continuas de hormigón apoyadas directamente sobre la explanada.

Además, en el ámbito internacional, existen intentos minoritarios de soluciones en base a prefabricados de hormigón (Ríos, 2010).

Las razones para el empleo de un tipo de firme pueden responder a diversos factores, tales como:

- *De tipo cultural*, representada por una gran inercia al cambio existente en el sector de la construcción y en los técnicos. Ello puede venir favorecido por una mayor rigidez de los procesos constructivos, a lo que se añade la inercia al cambio de maquinaria.
- *Económicos*, por una visión a corto plazo. Por ejemplo, la visión a corto de los pavimentos de hormigón, con unos mayores costes de implantación, aunque competitivos, hace que se valore insuficientemente los inferiores costes capitalizados, incluyendo los de explotación a largo plazo: *costes de implantación vs. costes de explotación.*
- *Imprecisiones en la técnica utilizada*, reflejada principalmente en incorre – cciones del acabado y, en mucho menor medida, algunos daños estructurales.
- *Percepción del usuario* con respecto al tema del confort acústico dentro del vehículo.

Desde el punto de vista social y ambiental, hay que tener presente: los aspec – tos de seguridad de la vía, el confort del conductor y la reducción de la contamina - ción acústica del entorno.

En consecuencia, se debe mejorar acabados de experiencias anteriores.

Ahora bien, no sólo son las circunstancias actuales las que deben servir de motor de cambio o pensamiento, sino las circunstancias futuras. En consecuencia, ese análisis debe plantearse, tal como señala Polimón (2008), siguiendo los tres principios básicos de la innovación: desarrollo sostenible, aumento de competitividad y genera - ción y gestión del conocimiento.

Con el importante avance de los métodos numéricos es posible estudiar el comportamiento de cualquier pavimento en circunstancias complejas, si bien no se suele utilizar los mismos en el dimensionamiento estándar, siguiéndose el empleo de métodos empíricos basados en las experiencias nacionales e internacionales.

Ello puede responder, por un lado, al buen hacer de la experiencia y, por otro lado, a que con frecuencia se consideran los pavimentos como el hermano pobre de las estructuras, olvidando que son estructuras, en las que el riesgo de rotura conlleva, usualmente, a daños menores, en lo que hace referencia a vidas humanas.

El objetivo de la ingeniería (bajo el paraguas del ciclo de vida: enfoque concurrente) ha de ser el asegurar que el ciclo de vida total del sistema sea considerado desde el principio. Este enfoque ha de integrar todos los factores necesarios (desempeño, productividad, fiabilidad, mantenibilidad, factor humano, soportabilidad, calidad, etc.) para brindar, en función de las necesidades identificadas, opciones de diseño viables. Esta orientación, o diseño concurrente, lleva aparejado la convivencia del ciclo de vida del sistema técnico con el ciclo de vida de su sistema soporte.

Del análisis realizado para la concepción y planteamiento del subsistema, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos específicos del proyecto:

a) *Planificación.* Buscar oportunidades de innovación para avanzar en relación a las soluciones existentes, adaptadas a circunstancias específicas de evolución, de costes de materias primas, dependencia externa, aspectos sociales, etc. Se debe buscar soluciones novedosas para avanzar en el desarrollo sostenible, aumentar la competitividad, así como la generación del conocimiento y su mejora continua.

b) *Proyecto.* Los pavimentos son una estructura y como tal hay que tratarlos.

c) *Ejecución.* Hay que analizar el nivel tecnológico del procedimiento constructivo, el equipo humano, nivel de coordinación de los agentes que intervienen, para cada alternativa.

d) *Materiales.* Buscar soluciones que utilicen recursos locales no importados (lo que implica una mayor independencia estratégica); análisis de prestaciones funcionales (deslizamiento, rozamiento lateral, etc.).

e) *Control de calidad.* Verificar los controles exigidos a cada alternativa.

f) *Conservación.* Identificar las diferencias apreciables en las políticas de gestión de pavimentos establecidas por la administración; actuaciones correctoras;...

g) ***Sostenibilidad.*** Reflexionar desde una perspectiva más amplia para ayudar a valorar las propuestas incorporando, no sólo los aspectos económicos, sino también los ambientales y sociales derivados de las alternativas planteadas.

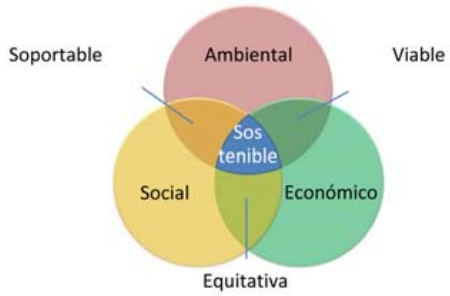


Figura 94: Ámbitos de la sostenibilidad.

Dada la creciente relevancia del tema, es cada vez más frecuente el uso del análisis de sostenibilidad en diversos sectores.

Los datos aportados hay que entenderlos como una referencia para ayudar al técnico en el análisis de la decisión, debiéndose contrastar con datos provenientes de otras fuentes; hay que resaltar, a este respecto, la importancia de definir, de forma

precisa, los límites del sistema en el caso de querer hacer una evaluación (comparación) de forma directa.

A manera de ejemplo y, para ayudar a entender el planteamiento , dado que una carretera es una "infraestructura social", en el análisis económico ha de tenerse en cuenta el coste de la indisponibilidad del uso en base al downtime planificado; este se traduce en un coste social para todos los usuarios de la vía (coste social de no disponibilidad).

Estudio Comparativo sobre los pavimentos rígidos y flexibles.

a) *Evaluación de costes.*

Diversos trabajos sugieren que, a pesar de tener un mayor espesor, los pavimentos flexibles presentarían menores costes de construcción que los obtenidos para los pavimentos de hormigón. Ello aparentemente se atribuye a los costes más bajos de materia prima y a la mayor experiencia existente en el caso de los pavimentos flexibles.

De acuerdo con la estimación realizada por FHWA (2009) sobre el coste de construcción de tres pavimentos flexibles y dos pavimentos rígidos, estos últimos son entre 20% y 82% más caros que los primeros.

Con respecto a los costes de mantenimiento, el Ohio Department of Transpor - tation (ODOT) ha llevado a cabo un amplio estudio con base en los datos obtenidos entre los años de 1960 y 1995 en cuatro autopistas compuestas por tramos de pavimento flexible y rígido. Los resultados obtenidos indican que el coste de mante - nimiento al final del período es entre 28% y 281% más elevado en los pavimentos de hormigón. Esa información, aunque está bien documentada, no coincide con resultados obtenidos por Jasienski (2007) que estimó que el coste de mantenimiento de los pavimentos de hormigón es un 59,6% menor que el de pavimentos flexibles.

Las estimaciones realizadas por FHWA (2009) también consideran que los costes de mantenimiento de los pavimentos de hormigón son más bajos. Por consiguiente, la diferencia inicialmente apreciada en el coste de construcción (entre 20% y 82%) se reduce al estimar el coste total final para un período de 30 años (tabla 17). En ella se aprecia que el coste total final del pavimento rígido es, en el mejor de los casos, un 11,1% más bajo y, en el peor de los casos, tan solo un 3,86% más elevado.

Tabla 17: Coste neto teniendo en cuenta operación de mantenimiento (FHWA, 2009).

Tasa de descuento	Flexible			Rígido[4]
	A[1]	B[2]	C[3]	
4%	325.513	279.248	288.359	290.019
7%	327.874	286.196	295.911	291.249

1: Compuesto por 5,08 cm de revestimiento asfáltico, 27,94 cm de base estabilizada con asfalto y 15,24 cm de base flexible, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en el año 16.
2: Compuesto por 24,13 cm de revestimiento asfáltico, 15,24 cm de base flexible y 20,32 cm de subbase caliza tratada, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en los años 9 y 20.
3: Compuesto por 24,13 cm de revestimiento asfáltico, 10,16 cm de base flexible y 20,32 cm de subbase caliza tratada, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en los años 9 y 20.
4: Compuesto por 30,48 cm pavimento de hormigón, 2,54 cm de capa asfáltica, 15,24 cm de base tratada con cemento y 20,32 cm de subbase caliza tratada.

Es importante destacar la variabilidad de los precios del betún en el tiempo, lo cual ha dado lugar a grandes desviaciones en el coste de las inversiones en obras públicas desde su presupuesto hasta la liquidación final de los proyectos.

Por el contrario, los precios del cemento, históricamente, se comportan de un modo muy regular y estable, tal y como se puede observar en la figura 95 adjunta:

Figura 95: Evolución de precios de betún y cemento (oscilaciones del betún frente a la estabilidad del hormigón).
Fuente: Estudio económico de secciones de firme (www.ieca.es)

El informe de Cemex de comparación del ciclo de vida entre soluciones rígidas y flexibles de pavimentos equivalentes en términos funcionales, avalado por EUPAVE y el MIT, cuyos análisis, en algunos casos se han basado en supuestos adaptados a la realidad española, y en otros se refieren a experiencias o usos foráneos, expone:

- las soluciones con base cemento resultan la opción más eficaz en la construcción de nuevas carreteras y en la rehabilitación de la red existente.
- En términos de coste de ciclo de vida, estas soluciones son más económicas que las de firme flexible basadas en aglomerado asfáltico debido a los mayores costes de mantenimiento de estas últimas. Además, en la actualidad, ante el incremento de los precios del betún, los firmes rígidos resultan más competitivos frente a los firmes flexibles ya desde la fase de construcción.

Como se puede apreciar (figura 96), los costes de construcción y mantenimiento acumulados en los cuatro primeros años son muy similares para ambas alternativas. Pero a partir del quinto año, cuando en función del desgaste de la vía comienza su mantenimiento, la alternativa flexible (asfalto) empieza a incrementar su coste acumulado, llegando prácticamente a duplicar el coste de la alternativa rígida (hormigón) en un escenario de ciclo de vida de 30 años.

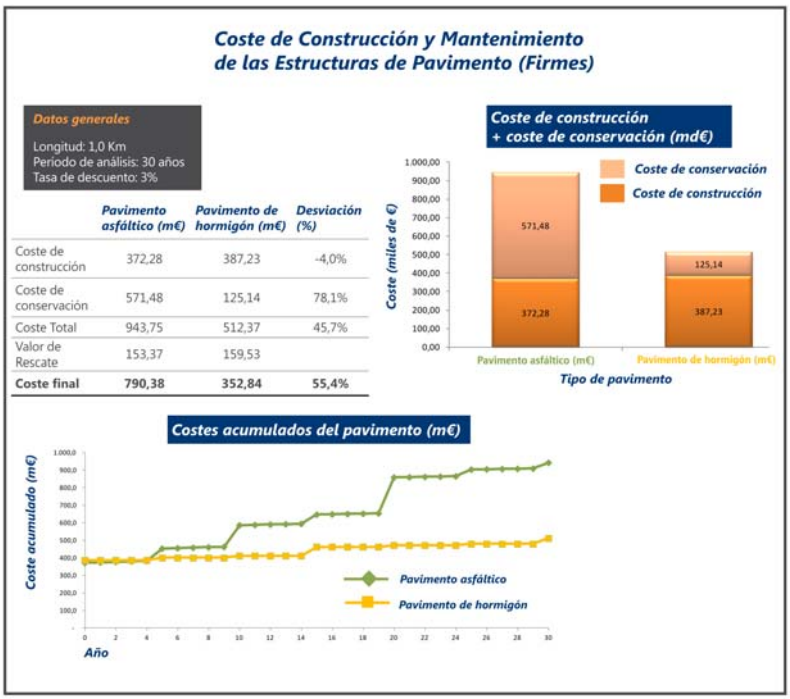


Figura 96: Comparación del ciclo de vida entre soluciones rígidas y flexibles de pavimentos equivalentes en términos funcionales. CEMEX

b) *Reflectancia.*

Los pavimentos de hormigón reflectan entre 75% y 700% más luz que los pavimentos flexibles. Al tener menor temperatura, los pavimentos de hormigón calientan menos el aire en la superficie (Pomerantz, 2000b), lo que puede ser especialmente significativo en las ciudades, puesto que las mismas presentan un área cubierta por vías que en muchos casos supera los 40°. (Akbari, 2007)

La figura 97 muestra la radiación en forma de calor emitida a la atmósfera por diferentes superficies. En ella se evidencia que, en particular durante las horas más calientes del día, el pavimento de hormigón emite una cantidad de radiación en forma de calor considerablemente más baja que los pavimentos de asfalto. (Aseada, 1993 y 1995)

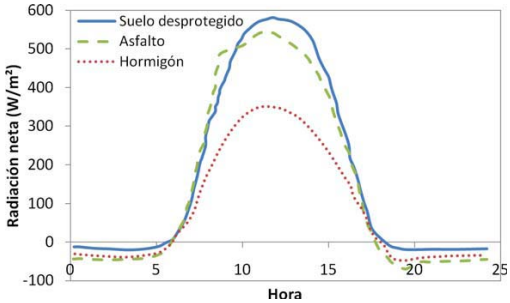


Figura 97: Radiación emitida a la atmósfera por hormigón, asfalto y suelo desprotegido (Asaeda, 1993).

El efecto de esa radiación sobre la temperatura del ambiente fue estimada por Kubo (2006), que analizó la relación entre la variación de temperatura del pavimento y de la temperatura del aire.

Los resultados de ese trabajo muestran que la sustitución de un material con reflectancia similar a la de un pavimento flexible por otro con reflectancia análoga a

la de un pavimento rígido supone una reducción de 0,6 °C en la temperatura máxima del aire.

Por otra parte, estudios realizados por Pomerantz (1997 y 2000a) sugieren que las temperaturas más elevadas de los firmes flexibles son perjudiciales al propio pavimento al afectar las propiedades de los materiales bituminosos usados. A ese respecto, se ha verificado una reducción de la rigidez (Yang, 1972; Croney, 1998) y de la viscosidad (Hunter, 1994) del pavimento con el aumento de la temperatura. Asimismo, las mayores temperaturas producen un deterioro más temprano y la reducción de la vida útil del pavimento flexible, lo que también lleva a mayores gastos en mantenimiento (Pomerantz, 2000c). En cambio, a lo largo de la vida útil de los pavimentos bicapa, las propiedades del hormigón empleado prácticamente no están afectadas por el rango de temperaturas observado.

La mayor capacidad de los pavimentos bicapa de reflectar la luz también contribuye a la eficiencia del alumbrado así como a la visibilidad de señales de tráfico y la seguridad de conductores y peatones durante la noche. En consecuencia, se podrían reducir los gastos en iluminación (al requerirse lámparas menos potentes) y el consumo de energía para iluminar la vía. Stark (1986) y Pomerantz (2000c) estiman una reducción de aproximadamente 20% en la intensidad luminosa requerida del alumbrado al pasar de un pavimento con reflectancia 0,1 (como es el caso de los firmes flexibles) a otro con reflectancia 0,3 (común en pavimentos rígidos bicapa). Ello lleva a una reducción estimada en 18,7% en los costes de instalación de la iluminación de la vía y de 19% en el gasto anual de energía.

Estos resultados son algo inferiores a los estimados por Gajda (1997), que obtu - vo reducciones de hasta un 31% en los gastos totales de instalación, mantenimiento y consumo de energía. Cabe matizar que la luz reflejada por pavimentos de hormigón no suele ser suficiente para ofuscar la visión del conductor. (Pomerantz, 2000c)

c) *Energía de construcción y energía embebida.*

La energía requerida para producir las materias primas, construir, mantener y rehabilitar 1 km de autopistas de cuatro carriles conformados con pavimento flexible y rígido durante un período de vida útil de 50 años fue evaluado por el Athena Sustainable Materials Institute (2006). El estudio contempla un tipo de pavimento flexible y dos tipos de pavimento rígidos (figura 98): la opción A, que presenta capa de rodadura y arcenes en material bituminoso, y la opción B, que se asemeja a los pavimentos bicapa.

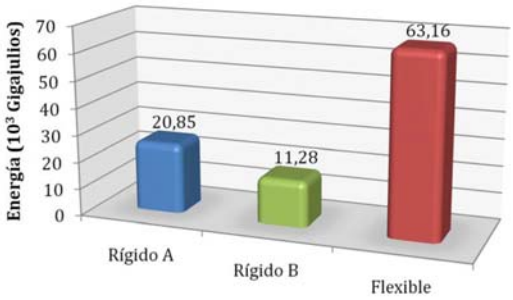


Figura 98: Energía total consumida para construir, mantener y rehabilitar diferentes tipos de pavimento (ASMI, 2006)

La figura 98 evidencia que la opción de pavimento rígido tipo A supone un consumo energético 67% menor que el estimado para el pavimento flexible. Sin embargo, la mayor diferencia se observa con respecto al pavimento rígido B (similar al pavimento bicapa) que arroja un consumo de energía 82% menor que el obtenido

con el pavimento flexible y 46% menor que el estimado para el pavimento rígido tipo A.

d) *Energía de uso.*

Estudios realizados por el National Research Council of Canada (Taylor, 2002; Taylor, 2006) muestran que hay una diferencia significativa en el consumo de combustible de camiones en función del tipo de pavimento. Ensayos realizados en condiciones reales para un amplio rango de temperaturas indican que los camiones circulando en pavimentos de hormigón presentan un consumo entre 0,8% y 6,9% (dependiendo del tipo de camión, de la velocidad y de la carga) inferior al medido en pavimentos flexibles. Ese aumento se debe a la mayor deflexión apreciada en los pavimentos flexibles que absorben más energía y generan ligeras restricciones al movimiento. Resultados similares ya habían sido identificados en estudio realizado por Zaniewski et al. (1982) en 12 autopistas teniendo en cuenta una amplia gama de vehículos y velocidades. Si bien en ese caso no se identificaron diferencias significativas en el caso de coches, la reducción de consumo de camiones en pavimentos rígidos llegó a un 20%.

También hay que tener en cuenta que los pavimentos de hormigón consumen una cantidad considerablemente inferior de combustible desde el punto de vista de la construcción de carreteras (mayoritariamente diesel). De acuerdo con informes del FHWA (1980), el uso de combustible es igual a 27,4 l / m³ de pavimentos asfálticos, un valor 5,6 veces mayor que el estimado para los pavimentos de hormigón (4,9 l/m³).

e) *Durabilidad.*

Un pavimento de hormigón, proyectado y ejecutado correctamente, tiene una durabilidad muy elevada, requiriendo generalmente solo una periódica reposición de la selladura de las juntas. De hecho, existen diversos pavimentos de hormigón en servicio por más de 40 ó 50 años, bajo volúmenes de tráfico pesado incluso mayores que los previstos en proyecto. La elevada durabilidad de esos pavimentos se ha verificado de manera similar en varios países para diferentes tráficos y circunstancias climáticas.

En Europa, uno de los ejemplos más notables es la autopista Bruselas – Lieja, abierta al tráfico en 1971/1972 y todavía en servicio con un tráfico de más de 20.000 camiones /día. En Estados Unidos, la autopista interestatal I-20 construida en 1946 en el valle de San Bernardino (California) presenta varios tramos todavía en servicio con una IMD superior a 250000 vehículos/día sin haber requerido ninguna rehabilitación estructural.

La mayor durabilidad de los pavimentos de hormigón se atribuye, en gran medida, al aumento de la resistencia de ese material a lo largo de los años. De hecho, la resistencia medida en testigos extraídos al cabo de varios años suelen ser muy superiores a la establecida en la fase de proyecto. En ese caso, el fallo del pavimento suele producirse por la fatiga a flexión que da lugar al agrietamiento generalizado del mismo. Algunos de los factores que influyen en ese fenómeno son el clima, la resistencia del hormigón, el espesor de la losa, la intensidad y el número de aplicaciones de las cargas, la forma y las dimensiones de las losas y las condiciones de su base de apoyo.

En contraste, la durabilidad de los pavimentos flexibles (en especial de las capas de rodadura) depende del fenómeno de envejecimiento de las mezclas bituminosas, el cual se manifiesta mediante la aparición de microfisuras, las pérdidas de mortero, las migraciones del ligante y el desplazamiento del ligante de la superficie del árido

grueso. A consecuencia de eso suelen aparecer deterioros como, por ejemplo, baches y peladuras. La solución de esos problemas pasa, generalmente, por la construcción de nueva capa de rodadura que muchas veces debe ir combinada con un refuerzo estructural.

El fenómeno del envejecimiento de las mezclas bituminosas presenta causas muy diversas que desencadenan procesos físicos y químicos complejos. Esos procesos son afectado por varios factores externos como: la radiación solar, la acción oxidante del aire y del agua, la helada y las sales fundentes empleadas contra ella, el derrame de aceites y de combustibles, la contaminación producida por el desgaste de los neumáticos, el polvo y los vertidos agrícolas. A pesar de ello, la duración de una capa de rodadura correctamente proyectada y construida debería ser de 7 años, o más. No obstante, una formulación inadecuada de la mezcla bituminosa puede acortar sustancialmente esa duración.

En EEUU se ha realizado un amplio estudio para determinar el tiempo desde la construcción del pavimento hasta su primera rehabilitación y la vida útil de ésta. Para ello, se ha considerado la información obtenida en 20 Estados teniendo en cuenta carreteras construidas con pavimentos rígido y flexible. También se estima la vida útil total de ambos pavimentos. (Rangaraju, 2008)

El estudio muestra que la 1ª rehabilitación ocurre, en el promedio, 7,5 años más tarde en los pavimentos rígidos, lo que equivale a una durabilidad inicial un 48% mayor. Sin embargo, esa diferencia se reduce al considerar la vida útil de la 1ª rehabilitación, que es tan solo un 27% (3 años) mayor en el pavimento rígido. Desde el punto de vista global se verifica que, en el promedio, la vida útil total de los pavimentos rígidos es un 35% (9,5años) mayor que la obtenida para los pavimentos flexibles.

f) *Aspectos sociales.*

f.1. *Confort y seguridad del usuario.*

La rugosidad inicial y su variación a lo largo de la vida útil del pavimento es uno de los principales factores relacionados al confort del usuario en la vía. En ese contexto, se considera que un pavimento más rugoso ofrece menos confort al conductor. Un estudio realizado durante cinco años por el Nova Scotia Department of Transportation and Public Works (NSTPW) evaluó el confort del usuario en secciones adyacentes de pavimentos rígido y flexible. En ese caso, el nivel de confort se estimó a través del índice de confort de conducción (ICC), medido desde la construcción de ambos pavimentos. La figura 99 muestra la evolución del ICC, siendo valores más elevados indicativos de un mayor confort del conductor. (NSTPW, 1999)

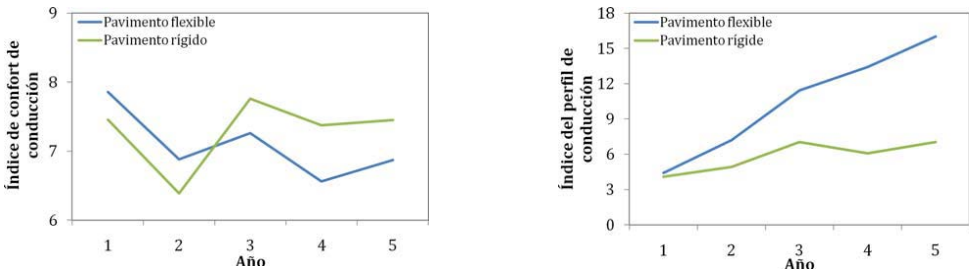


Figura 99: Evolución del: a) índice de confort de conducción y del b) índice de perfil de conducción (NSTPW, 1999)

En la figura se aprecia que inicialmente el pavimento flexible presenta un ICC más elevado. Sin embargo, la degradación natural del pavimento flexible produce

una reducción en dicho índice y del confort que, a partir del tercer año, pasa a ser inferior al del pavimento rígido.

Las diferencias entre los pavimentos son más notables al comparar los resultados del índice del perfil de conducción (IPC), que está relacionado con la rugosidad del pavimento medida en un tramo de 100 m. La figura 99b muestra la evolución del IPC medido, siendo valores más elevados indicativos de una mayor rugosidad y un consecuente menor confort del conductor. Tal y como puede apreciarse, ambos pavimentos presentan valores muy próximos de IPC en el primer año. No obstante, en un período de 5 años, el pavimento flexible presenta un incremento de 264% en el IPC, mientras que el aumento observado en el pavimento rígido fue de tan solo un 72%. Ello pone de manifiesto la degradación más acelerada del primero, lo que debería reflejarse en una reducción significativa del confort del conductor.

La fricción existente entre la capa de rodadura y los neumáticos es otra característica superficial que afecta principalmente el frenado de los vehículos y, por consiguiente, a la seguridad del conductor. De acuerdo con un informe elaborado por el Wisconsin Department of Transportation (WDT, 1996), el rozamiento superficial medido a una velocidad estándar de 40 millas por hora (64,36 km/h) disminuye con la edad del pavimento. A edad 0, los pavimentos de hormigón y de asfalto presentan una fricción superficial equivalente a un coeficiente de rozamiento de 0,55 y 0,40 respectivamente. Al final de la vida útil del pavimento flexible, éste presenta un coeficiente de rozamiento de aproximadamente 0,32, algo inferior a los 0,42 presentados por un pavimento de hormigón con la misma edad.

Los mayores coeficientes de rozamiento de los pavimentos de hormigón se reflejan en una menor distancia de frenado. Se verifica que la distancia de frenado medida para el pavimento de hormigón es entre 14% y 40% inferior a la medida para el pavimento flexible. (Metz, 1990)

f.2. *Contaminación sónica.*

El tipo de pavimento y su textura superficial influyen en el nivel de contaminación sónica emitida con el paso de vehículos. Existen diversos estudios que concluyen que los pavimentos de hormigón (en particular aquellos con textura transversal) presentan un mayor nivel de ruido que las mezclas bituminosas. A título de ejemplo, en la tabla 18 se muestra la intensidad sónica medida en el borde de la carretera teniendo en cuenta diferentes tipos de pavimento en África del Sur. (McNerney, 2000)

Tabla 18: Ruido medido en diferentes tipos de pavimento (McNerney, 2000).

Pavimento	*Intensidad sónica (dBA)*
Asfalto de granulometría abierta	79,7
Asfalto de granulometría densa	79,8
Hormigón con juntas	89,0

En ella se observa que los pavimentos de asfalto con granulometría abierta y densa presentarán un nivel de ruido 8,2 dBA más bajo que el apreciado en el pavimento de hormigón con juntas. Experimentos realizados por Polcak (1990) y Van Heystraeten (1990) corroboran estos resultados, indicando una reducción de aproximadamente 7 dB en la contaminación sónica emitida por pavimentos flexibles.

Sin embargo, se ha comprobado que, a igualdad de resistencia al deslizamiento, las texturas longitudinales dan lugar a unos niveles sonoros análogos a los de muchas

mezclas bituminosas (FHWA, 1996). Por ello, en países donde se han utilizado tradicionalmente acabados de tipo transversal, como es el caso de Alemania o Estados Unidos, éstos se van abandonando a favor de las texturas longitudinales.
Con el denudado de los pavimentos se pueden obtener niveles sonoros incluso más reducidos. Cuanto menor es el tamaño máximo del árido, más reducido es también el ruido de rodadura (FHWA, 1996). De ahí que en Austria los pavimentos de hormigón se construyan en dos capas, empleándose en la superior, áridos con un tamaño máximo de 8 a 11 mm.

La larga experiencia que se tienen en Austria con el denudado ha permitido constatar que, si bien los niveles sonoros que se obtienen inicialmente con el mismo son superiores a los de las mezclas bituminosas drenantes, el aumento del nivel sonoro que se produce en todos los tipos de superficie con el paso del tiempo hace que, transcurridos 10 años, los pavimentos de hormigón denudado sean los más silenciosos. A pesar de ello, cabe señalar que los pavimentos flexibles siguen llevando cierta ventaja con respecto a la mayoría de las técnicas usadas para dar el acabado superficial del pavimento de hormigón.

f.3. *Resistencia al fuego.*

Entre los años 1999 y 2001 han sucedido una serie de incendios catastróficos en túneles de carretera. Estos mostraron la necesidad de una adecuada elección de materiales para la construcción de los pavimentos de los túneles, a fin de aumentar la seguridad del conductor y reducir el tiempo fuera de servicio de la carretera. En ese sentido, el uso de mezclas bituminosas puede suponer un riesgo considerable. El betún presente en las mismas es un material altamente inflamable que entra en combustión a temperaturas del orden de los 400 ºC y puede incrementar así la carga de fuego generada por el incendio.

Además, el betún en combustión emite sustancias de toxicidad elevada (monóxido y dióxido de carbono, aldehidos, cetonas, hidrocarburos alifáticos y aromáticos y compuestos de azufre) que pueden acumularse en el ambiente poco ventilado de los túneles.

El hormigón, por su parte, presenta un mejor desempeño frente a incendios al ser un material incombustible que no incrementa la carga de fuego ni desprende gases tóxicos.

Además, la baja conductividad térmica del hormigón genera una barrera a la propagación del calor que limita el incremento de temperatura a través del mismo. Consecuentemente, aunque se produce una degradación superficial, las propiedades mecánicas de la estructura a unos pocos centímetros de profundidad se mantienen en niveles aceptables por largos períodos.

El principal inconveniente del hormigón en situaciones de incendio es el desprendimiento explosivo de trozos de la superficie por el aumento de la presión interna de los poros (spalling). Sin embargo, ese fenómeno es más crítico en hormigones de alta resistencia (60 MPa o superiores) que generalmente no se corresponden con los empleados para la construcción de pavimentos.

Teniendo en cuenta los aspectos descritos con anterioridad, en Austria es obligatorio, desde 2001, el empleo de pavimentos de hormigón en los túneles de más de 1 km de longitud. Esta medida ha sido adoptada también en España a partir 2006 para los túneles de la Red de Carreteras del Estado (Real Decreto 635/2006). Sin embargo, el R. D. 635/2006 permite la adopción de pavimentos bituminosos en casos debidamente justificados, manteniendo niveles de seguridad en el túnel análogos a

los que se obtendrían con pavimentos de hormigón. Cabe matizar que, en base al comportamiento verificado en casos reales y en los ensayos de ignición, las mezclas bituminosas pueden alcanzar niveles de desempeño que se acercan a los de un pavimento de hormigón.

3.1. Fase de diseño conceptual: Etapa de Innovación (I). Arquitectura del sistema.

En esta fase se define la configuración inicial del sistema a nivel abstracto. Se realiza el análisis de necesidades, los requerimientos a nivel operativo y de mantenimiento del sistema y los estudios de viabilidad.

Para el caso de contratos integrados puede suceder que parte del diseño venga condicionado por el cliente. Por tanto, las características del contrato establece el punto en el cual comienza el proceso.

3.2. Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas.

En esta fase se define la configuración inicial a nivel de subsistemas y se consideran la gama de alternativas (diferentes alternativas para los subsistemas con diferentes especificaciones técnicas, de operación y necesidades de mantenimiento). El objetivo es la definición refinada de subsistemas en términos funcionales. Es preparatoria para la definición a nivel de componentes.

En el diseño de la Solución Técnica y de Operación y el Mantenimiento (STM) se consideran no sólo aspectos funcionales, sino también factores económicos y otros aspectos vinculados al problema de diseño (emplazamiento, restricciones a la subcontratación**,** restricciones legales y de mercado regulado**,** garantías, soporte logístico, entre otras).

P1: Análisis de requisitos. Requisito de sostenibilidad.

Se analizan los requisitos RAMS para el proyecto N-302 y se distribuyen a los diferentes subsistemas.

Se plantea como aportación la evaluación de las alternativas desde el *punto de vista de su sostenibilidad*. Dado que una carretera es una infraestructura para la sociedad, en el análisis económico se considera clave tener en cuenta el coste de la disponibilidad del uso que tenga en cuenta el tiempo que se tarda en hacer reparaciones y mantener una instalación (dowmtime planificado). Se parte de la hipótesis de que es un coste importante para todos los usuarios de las infraestructuras *(coste social de indisponibilidad o de no disponibilidad).*

P2: Análisis funcional y asignación de requisitos.

En este paso se seleccionan y definen los criterios para evaluar las alternativas y se determinan los trade-off de requerimientos. Los criterios para la evaluación se extraen de los requerimientos de desempeño especificados por el cliente, a partir de los cuales, se desarrollan los trade-off de requerimientos que serán usados para evaluar y clasificar (puntuar) las diferentes alternativas. Los criterios de evaluación para el proyecto son: fiabilidad, disponibilidad, downtime, coste inicial, costes de mantenimiento y costes de riesgos específicos. Los trade-off utilizados por Breijn para evaluar las alternativas fueron:

1. Fiabilidad del pavimento de la carretera: 99, 8%.
2. Disponibilidad del pavimento de la carretera: 99, 8%.
3. Downtime menor de 350 horas.

P3: Alternativas para el subsistema firme y pavimentación. Gama de alternativas.

En este paso se identifican y evalúan diferentes configuraciones de diseño (al - ternativas). Se identifican cinco tipos diferentes para ser evaluadas para una superficie de 5.000 m^2. Los tipos se diseñan y configuran en diferentes capas. Para definir las características geométricas y mecánicas de las diversas capas, así como de su proceso constructivo, se tiene en consideración aspectos estructurales (dimensio - namiento), funcionales, sociales, ambientales, constructivos y económicos (precios de mercado).

La tabla 19 muestra un resumen de las cinco alternativas y su proceso cons - tructivo:

Tabla 19: Alternativas de pavimentos a evaluar.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5
Pavimento - rodadura (Top layer)	Dual ZOAB	Dual ZOAB	Microflex	Microflex	Concrete (234 mm)
Base 1 (Middle Layer)	40mm STAB	40mm STAB	65mm STAB	60mm STAB	-
Base 2 (Middle layer)	60mm STAB	-	-	70mm STAB	-
Sub-base (Bottom layer)	70mm STAB	65mm STAB	70mm STAB	70mm STAB	-
Cimentación(Foundation)	Unbounded	bounded	bounded	Unbounded	Unbounded

(*) ZOAB es una mezcla de asfalto muy abierto con buena reducción de ruido y buenas cualidades de drenaje; la vida técnica estimada es de 10 años.
(**) STAB mezcla de asfalto muy estable con un alto poder de carga.
(***) Microflex es una mezcla de asfalto con algo menos de reducción de ruido que ZOAB pero con una mayor esperanza de vida técnica (alrededor de 20 años).

P4: Análisis del factor humano.

El análisis del factor humano es útil cuando sus decisiones influyen en el funcionamiento del sistema. En este caso, el factor humano tiene poca o nula influencia en el funcionamiento del pavimento.

Los accidentes de tráfico debidos a un error humano, por ejemplo, pueden influir en el funcionamiento de la carretera, pero al no ser imputables al subsistema se excluyen de los requisitos de desempeño.

El factor humano sí puede influir en la fase de ejecución, donde se determinan algunas de las características estructurales de los pavimentos. Por ejemplo, en la laminación en pavimentos de asfalto, el grado de compactación del material influye en la vida útil del asfalto. Sin embargo, no existen datos disponibles sobre esa correlación.

P5: Realización FTA.

Esta técnica es de utilidad para el modelizado y análisis de los mecanismos de fallo del subsistema. Para el subsistema en estudio existe poco conocimiento acerca de los mecanismos de fallo. Los proyectistas experimentados tienen una idea global de cómo y cuándo se producirá un fallo en la vida del pavimento; sin embargo, no disponen de datos específicos sobre las causas raíz de los fallos. Por tanto, es un proceso que habría que iniciar con objeto de disponer de una base de datos rigurosa.

En base a los argumentos anteriores, no es posible realizar un FTA en este caso.

P6: Realización FMECA del subsistema. Documentación de los modos de fallo.

Se identifican, se estudian los efectos y las consecuencias de los principales modos de fallo que pueden ocurrir durante la vida del subsistema (FMEA) y la prevención de problemas, especialmente los que se califican como críticos.

En base a la información de los proyectistas y constructores experimentados, se identifican siete modos principales de fallo:

1. raveling (deshilachamiento del pavimento).
2. Desnivel transversal.
3. Desnivel longitudinal.
4. Grietas (cracking).
5. Fallo en los bordes de la calzada.
6. Irregularidades (pequeñas grietas, baches o bultos en la capa superior del pavimento).
7. Deshilachamiento o grietas a lo largo de la unión de dos pavimentos (unión longitudinal).

El análisis de criticidad tendrá por objeto calificar cada modo de fallo de acuerdo a la influencia combinada de la severidad (consecuencia del fallo, si ocurre) y la ocurrencia (probabilidad o frecuencia del fallo). El riesgo de un modo de fallo y sus efectos se determinará por tres factores: la severidad, la ocurrencia y la probabilidad de detectarlo antes de que se produzca (detección); se evaluará a través del *RPN-teórico* y se expresará, en general, en términos de coste. Este valor será utilizado para calificar el nivel de criticidad.

La ocurrencia de un cierto modo de fallo se define de modo empírico(a través de la experiencia de los proyectistas y constructores).

Desde un punto de vista técnico, el estado del pavimento puede representarse mediante un indicador global *(indicador de estado)* que puede incluir distintos factores relacionados con el estado de aspectos concretos como son, básicamente, la regularidad superficial y la capacidad estructural del firme en referencia a la estructura misma, así como también aspectos de conservación más ordinaria (limpieza, etc.).

Por su parte, el estado o condición de un cierto modo de fallo se establece en función de las etapas recogidas en la normativa sobre carreteras. Para la norma holandesa, estas etapas van desde el nivel A (alto nivel de calidad) al nivel F (más bajo nivel de calidad). En la práctica, los clientes/usuarios mayoritariamente exigen al pavimento un nivel de calidad mínima (nivel B). El criterio para calificar el estado del pavimento será el siguiente: *"Un estado de la calzada por debajo del nivel B se considera un fallo, lo que exige una actuación de mantenimiento.*

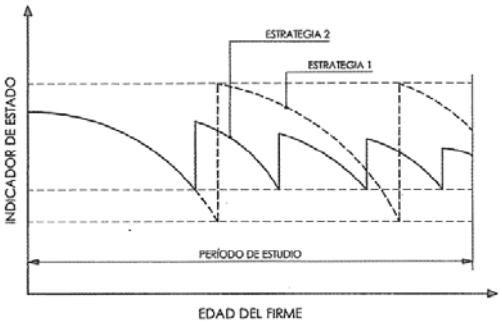


Figura 100: Diferentes estrategias de conservación de un firme: esquema usual (Kraemer, 2004).

Cuando el nivel de calidad está por debajo del nivel B, los efectos del modo de fallo se determinan por las actuaciones requeridas para restaurar al nivel mínimo (B).

Un aspecto a destacar, es que la curva de degradación es específica. Por ello, a igualdad de factores, las pendientes de las curvas de degradación correspondientes a este tipo de soluciones, en general para pavimentos de hormigón, son más suaves que otras soluciones, lo que implicaría periodos más largos de actuación.

Con la ocurrencia y los efectos – consecuencias de un modo de fallo, el riesgo para ese modo de fallo, el riesgo total de todos los modos de fallo y el coste del riesgo para una alternativa (RDC_i) es calculado.

La ocurrencia de un modo de fallo se supone diferente para cada alternativa. Por ejemplo, la primera alternativa tiene una doble capa ZOAB en la parte superior. La vida técnica, para el criterio considerado, para la alternativa 1 y el modo de fallo 1 (raveling), es de 10 años. La alternativa 3 tiene Microflex como capa superior (más resistente contra el raveling); su vida técnica, para el criterio considerado, es de 20 años. Para la alternativa 5 (hormigón) el modo de fallo 1 no existe.

Las curvas de la figura 101 permiten estimar la probabilidad de ocurrencia, antes de lo esperado, del modo de fallo 1 para las diferentes alternativas; con esta información, se puede cuantificar la componente RDC del modo de fallo 1 para cada alternativa. Por ejemplo, para la alternativa 1, eventualmente supondría la sustitución de una o dos capas de asfalto de 5000 m^2 totales. Los costos de dicho reemplazo son Re*DC* = 48.500 € y el downtime (MTTR) de 16 horas.

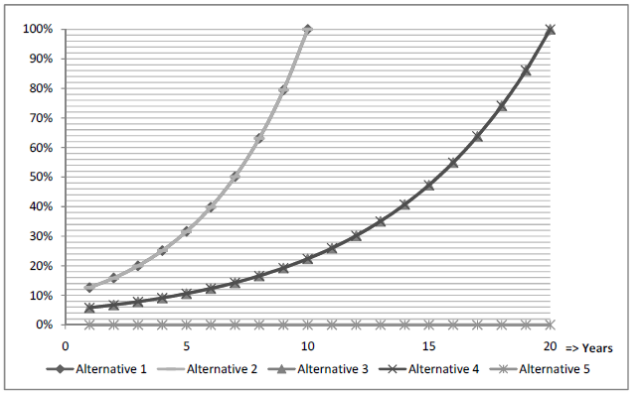


Figura 101: Ocurrencia del modo de fallo 1(raveling) en % / año sobre mezcla de asfalto ZOAB. [Breemer, J.J.A., 2009]

El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incer - tidumbre de una decisión.

P7: Análisis de seguridad.

No aplica en este caso dado que sólo se está evaluando los materiales y la componente estructural y funcional del diseño.

P8: Realización ETA .Desarrollo de escenarios posibles.

Este análisis es necesario para identificar los sucesos vinculados a fallos que estén recogidos en el contrato de mantenimiento. Ilustra las consecuencias del fallo de un componente o sistema.

No se realiza en este caso debido al hecho de que los eventos que pueden producir un fallo potencial del pavimento, tales como accidentes o la caída de cargas, se excluyen en el contrato de mantenimiento.

P9: Análisis del mantenimiento y de garantías. Tareas de conservación.

La función mantenimiento tiene una influencia importante en la gestión de riesgos, y por tanto, en la rentabilidad económica del sistema técnico (Zoeteman, A., & Braaksma, E., 2001). De forma general, la función mantenimiento "hereda" un perfil de riesgo desde la fase de diseño (ingeniería) que ha de gestionar en base a las siguientes restricciones básicas: la estrategia de operación, limitaciones presupuestarias y de tiempo.

Los efectos de un análisis y diseño riguroso de esta función se traducen en una mejora de la disponibilidad, fiabilidad y operatividad, una mayor seguridad, menor nivel de pérdidas de producción, menores efectos medioambientales, costes de mantenimiento, entre otros.

El objetivo general de las tareas de conservación consiste en alargar al máximo la vida de la construcción, manteniendo unos criterios mínimos de calidad técnica que garanticen la seguridad y comodidad del usuario. Así pues, parte de las actividades que comprende la gestión de las tareas de conservación deben contemplarse desde el mismo momento del diseño del proyecto constructivo.

El objetivo de este proceso (P9) es la definición y organización de las tareas de mantenimiento para la estimación y valoración de los recursos necesarios para la gestión del pavimento en servicio. Se distinguen básicamente tres tipos:

- *Actuaciones ordinarias.* Por actuaciones ordinarias se entiende las que se llevan a cabo de manera rutinaria y periódica a lo largo de la vida útil de la estructura, según la estrategia de conservación adoptada, sin implicar un nivel de modificación sustancial de los elementos originales del firme. Estas son todas las tareas asociadas a la reparación de desperfectos de carácter más bien puntual y de poca gravedad (reparación y resellado de juntas, sellado de nuevas fisuras, etc.).
- *Renovaciones superficiales.* El objetivo de la renovación superficial es otorgar al firme unas características superficiales *(textura y regularidad superficial)* cumpliendo con las exigencias de las normativas. En general, la mejora de la regularidad superficial se lleva a cabo mediante técnicas de eliminación parcial del material, recrecimiento (adición de material), o incluso una combinación de ambas.
- *Rehabilitaciones estructurales.* Son las actuaciones correspondientes, de modo general, a la ejecución de *refuerzos* (recrecimiento) y al *recalce de losas*. Dan respuesta a un deterioro importante que ha hecho disminuir sustancialmente la capacidad estructural del firme.

Es tarea de la función mantenimiento el reestablecer un equipo de producción, o mantener este, en las condiciones de funcionamiento especificadas. La política de mantenimiento elegida afectará al comportamiento al fallo, y por tanto, a la capacidad de producción disponible y los costes de operación.

El plan de mantenimiento, para cada alternativa, se diseñará sobre la base de los resultados del FMECA obtenidos en P6.Con la información de los efectos asociados al modo de fallo de una alternativa puede ser estimado el número de fallos y la cantidad de downtime esperada para un periodo de mantenimiento . Esta información permite el cálculo de la fiabilidad de la alternativa(i). El uptime puede ser calculado

a partir del downtime y el tiempo total de operación. La disponibilidad será calculada a partir del uptime y el downtime.

Cada alternativa tiene diferentes características y necesitan una estrategia de mantenimiento diferente (variables independientes). Por ejemplo, la vida técnica de la mezcla de asfalto ZOAB (alternativas 1 y 2) es de 10 años, y la de la mezcla de asfalto Microflex (alternativas 3 y 4) es de 20 años. Para asegurar un nivel adecuado de calidad dentro del periodo de mantenimiento para las alternativas 1 y 2 es necesario reemplazar la capa superior a los 10 años. Sin embargo, las alternativas 3 y 4 (Microflex) no requieren reemplazo de la capa superior en el periodo de mantenimiento especificado; sin embargo, necesita más mantenimiento durante su vida técnica.

(*) *Las actuaciones de conservación de carreteras, aún pareciendo de importancia secundaria respecto al proyecto y ejecución, ocupan un lugar fundamental en el desarrollo económico y so - cial de un país, ya sea por la propia explotación de las mismas como por el importante valor pa trimonial al que refieren. Por ello, es altamente recomendable la elaboración de una estra tegia de conservación desde el momento de proyecto , logrando de este modo, si la estrategia es buena, una prolongación de la vida con un menor coste.*

- ***Análisis de las garantías de desempeño y ecuaciones de compensación.***

Se considera un período de mantenimiento para el pavimento de 15 años y una vida residual de 5 años. Total, 20 años.

El contratista tiene libertad para determinar la estrategia de mantenimiento.

El plan de mantenimiento, para cada alternativa, se diseña sobre la base de los resultados del FMECA. Con la información de los efectos asociados al modo de fallo de una alternativa puede ser estimado el número de fallos y la cantidad de downtime esperada para un periodo de mantenimiento. El tiempo total de operación es de 175200 horas. Con esta información, los datos relevantes para la alternativa 1, son:

- Fallos estimados durante el periodo de 20 años: 27.
- Sustitución de la capa superior a los 10 años.
- Fiabilidad: 99.98 %.
- Disponibilidad: 99.86 %.
- Downtime planificado: 252 horas.

Para el modelo propuesto, las “garantías de desempeño” son los niveles mínimos (niveles de corte) de las Especificaciones de funcionamiento que debe cumplir una STM para ser aceptada. En este caso son:

1. Fiabilidad $\geq$ 99,8 %.
2. Disponibilidad $\geq$ 99,8 %.
3. Downtime menor de 350 horas.

Como el uptime es clave en la estrategia de operación, la disponibilidad (o mejor la indisponibilidad) se convierte en el objetivo principal de la gestión del mantenimiento.

Se considera un factor clave para el análisis, dado que una carretera es una infraestructura para la sociedad, el coste de la disponibilidad del uso que tenga en cuenta el tiempo que se tarda en hacer reparaciones y mantener una instalación (downtime planificado). Este tiempo se traduce en un coste importante para todos los usuarios de la infraestructura al que denominamos “coste social de indisponibi - lidad”.

- ***Análisis de sostenibilidad. Ecuaciones de compensación: Coste social de no Disponibilidad (Principio de "alquiler de carril (lane rental)").***

En relación a las actividades de conservación de firmes y carreteras, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, en 1987, define la gestión intrínseca como: *"el procedimiento consistente en coordinar y controlar todas las actividades encaminadas a conservar los firmes de carreteras, asegurando la mejor utilización posible de los recursos disponibles; es decir, haciendo máximo el beneficio para la sociedad"*.

Las situaciones que generan indisponibilidad de las instalaciones productivas repercuten negativamente en la rentabilidad y, en este caso particular, también al usuario de la vía. Para un proceso productivo no hay nada más ruinoso que la improductividad de los capitales invertidos en los activos fijos que sustentan las funciones esenciales del proceso.

Sin embargo, a nivel técnico, es muy poco frecuente encontrar instrumentos que permitan conectar las actuaciones de mantenimiento con la repercusión económica que estas actuaciones tienen sobre la rentabilidad de la empresa, y consecuentemente, sobre su cuenta de resultados.

Se utilizarán las ecuaciones de compensación para poner en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo propuesto de toma de decisiones basado en el riesgo.

Otro aspecto que refuerza este análisis, es la búsqueda equilibrada de una forma soportable, viable y equitativa, de la sostenibilidad de las diferentes alternativas en sus tres ámbitos fundamentales: el económico, el social y el medioambiental (Adam, 2006; UN, 2005). En este caso, se plantea la traducción económica del downtime como coste social de indisponibilidad, a través del principio de "alquiler de carril (lane rental)". Este principio se utiliza para minimizar el impacto sobre el usuario de la vía de la solución adoptada; transfiere los costes diferidos al contratista (compensación negativa).

Obliga al contratista a valorar, a la hora del diseño de la solución, la tasa de compensación entre cerrar o alquilar un carril; ello genera un doble efecto: un incentivo financiero en el contratista para minimizar el tiempo en que un carril no está en funcionamiento y una reducción del perjuicio sobre el usuario.

En este caso, el cliente (administración) exige una cantidad mínima de mantenimiento y de interrupción del servicio para el usuario (contribuyente) de la calzada.

Es muy importante traducir el downtime (o la indisponibilidad) en términos de coste. Este aspecto se considera clave para la selección de la *STM+C* que garantice un nivel de competitividad sostenible en el tiempo (sostenibilidad económica).

El modelo general para evaluar las pérdidas de ingreso debidas a este factor es una función lineal del downtime. La ecuación de compensación por cierre de un vial por mantenimiento contractual sería:

$$\text{Coste social de no disponibilidad (penalización)} = 3000 \times \text{Downtime(horas)} = (€) \quad \textbf{(12)}$$

P10: Cálculo del LCC .Cálculo del coste total.

Los costes son ajustados de forma proporcional por motivos de confidencialidad. Uno de los objetivos principales del análisis LCC es cuantificar el "Coste Total de Propiedad" a lo largo del ciclo total de vida establecido para el subsistema.

Es muy importante identificar todos los elementos de costes que de forma significativa afectan al LCC total. Dado la variedad de sistemas, es difícil establecer un modelo universal que permita definir los elementos de costes asociados a cada análisis LCC.

La recomendación generalizada es que se particularice el CBS y las categorías de costes para cada área de aplicación del análisis LCC. Sin embargo, existen unas categorías de costes que son comúnmente usadas en muchos estudios: Costes de Adquisición y Costes de Propiedad (adoptada por IEC 60300-3-3). Estas dos categorías pueden ser alternativamente denominadas, según ISO15663, como"Gastos de Capital (CAPEX)"y"Gastos de Operación (OPEX)". Esto no debe ser considerado una referencia rígida; todo lo contrario, flexible en función del sistema en estudio.

Otra categoría de clasificación de costes al más alto nivel del CBS común para las plantas de producción continua (energía, gas, petróleo) es la siguiente: "Costes de adquisición", "Costes de operación" y "Costes diferidos de producción".Esta última categoría hace referencia a la penalización (penaltis) por incumplimiento de las condiciones de suministro establecidas en contrato (normalmente referenciadas a la cantidad a suministrar en un periodo dado). Su cuantificación se hace, generalmente, sobre la base de la indisponibilidad de funcionamiento del sistema de producción y una unidad de coste del producto (ecuación de compensación negativa). El coste de esta categoría puede tener un impacto importante sobre el LCC si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Luego, para este tipo de industrias, o similares (industrias de proceso continuo), es una categoría muy importante a tener en cuenta en el análisis LCC.

Para el caso en estudio, esta categoría se cuantifica a través de **(12)** ("lane rental").

Las categorías de costes relevantes consideradas para el caso en estudio son: coste inicial, coste de mantenimiento, coste de la dimensión riesgo y costes diferidos (penalizaciones). Los costes inicial y de mantenimiento son obtenidos a través de la información proporcionada por el contratista. El coste de la dimensión riesgo se calcula en base a los resultados del FMECA (P6).

Se plantea como aportación en el LCCA la evaluación de las alternativas desde el punto de vista de su" sostenibilidad social" en base a lo que se ha denominado" coste social de no disponibilidad".

La tabla 20 y la figura 102 muestran los costes de las alternativas sobre la base del LCCA para los casos 1 y 2:

Caso 1 (modelo propuesto): Considera compensaciones *(sostenibilidad social).*

Caso 2: No considera compensaciones.

Tabla 20: Trade-off requerimientos (casos 1 y 2).

Caso 1: Modelo propuesto. Considerando compensaciones (Coste social de indisponibilidad).

Mejor alternativa					***Caso 1: (X)***
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	**Alternativa 3**	Alternativa 4	**Alternativa 5**
Fiabilidad (R)	99.98%	99.98%	**99.99%**	99.99%	**99.99%**
Disponibilidad (A)	99.86%	99.86%	**99.89%**	99.89%	**99.91%**
Downtime (horas)	252	255	**188**	188	**156**
(1) Coste Inicial CAPEX (€)	240.750	202.700	**179.550**	217.600	**321.800**
(2)Compensación Downtime (€) ***Coste social de indisponibilidad***	756.000	765.000	**564.000**	564.000	**468.000**
(3) Mantenimiento coste (€)	151.800	151.800	**128.687**	128.687	**96.086**
(4) Riesgo (€)	97.000	97.000	**54.620**	54.620	**17.578**
OPEX: $\sum_{2}^{4}$	1.004.800	1.013.800	**746.977**	747.307	**581.664**
CosteTotal (€): $\sum_{1}^{4}$	1.245.550	1.216.500	**926.527**	964.907	**903.464**

Caso 2: Sin compensación.

Mejor alternativa			***Caso 2: (X)***		
Criterio	Alternativa 1	Alternativa 2	**Alternativa 3**	Alternativa 4	**Alternativa 5**
Fiabilidad (R)	99.98%	99.98%	**99.99%**	99.99%	**99.99%**
Disponibilidad (A)	99.86%	99.86%	**99.89%**	99.89%	**99.91%**
Downtime(horas)	252	255	**188**	188	**156**
(1) Coste Inicial (€) CAPEX	240.750	202.700	**179.550**	217.600	**321.800**
(2) ***Coste social de indisponibilidad*** Downtime (€)	No se considera	No se considera	No se considera	No se considera	No se considera
(3) Mantenimiento coste (€)	151.800	151.800	**128.687**	128.687	**96.086**
(4) Riesgo (€)	97.000	97.000	**54.620**	54.620	**17.578**
OPEX: $\sum_{3}^{4}$	248.800	248.800	**182.977**	183.307	**113.664**
CosteTotal (€): $\sum_{1}^{4}$	489.550	451.500	**362.527**	400907	**435464**

(*) Los costes son ajustados de forma proporcional por razones de confidencialidad.

(**) Ecuación de compensación: Coste social de indisponibilidad (€) = 3000 x Downtime (horas).

Se observa que la alternativa con mayor CAPEX (alternativa 5) es la más económica en términos de coste total de ciclo de vida para el periodo de mantenimiento contratado. Por lo tanto, LCCA es necesario para tomar decisiones con rigor cuando se consideran varias alternativas para un proyecto DBM.

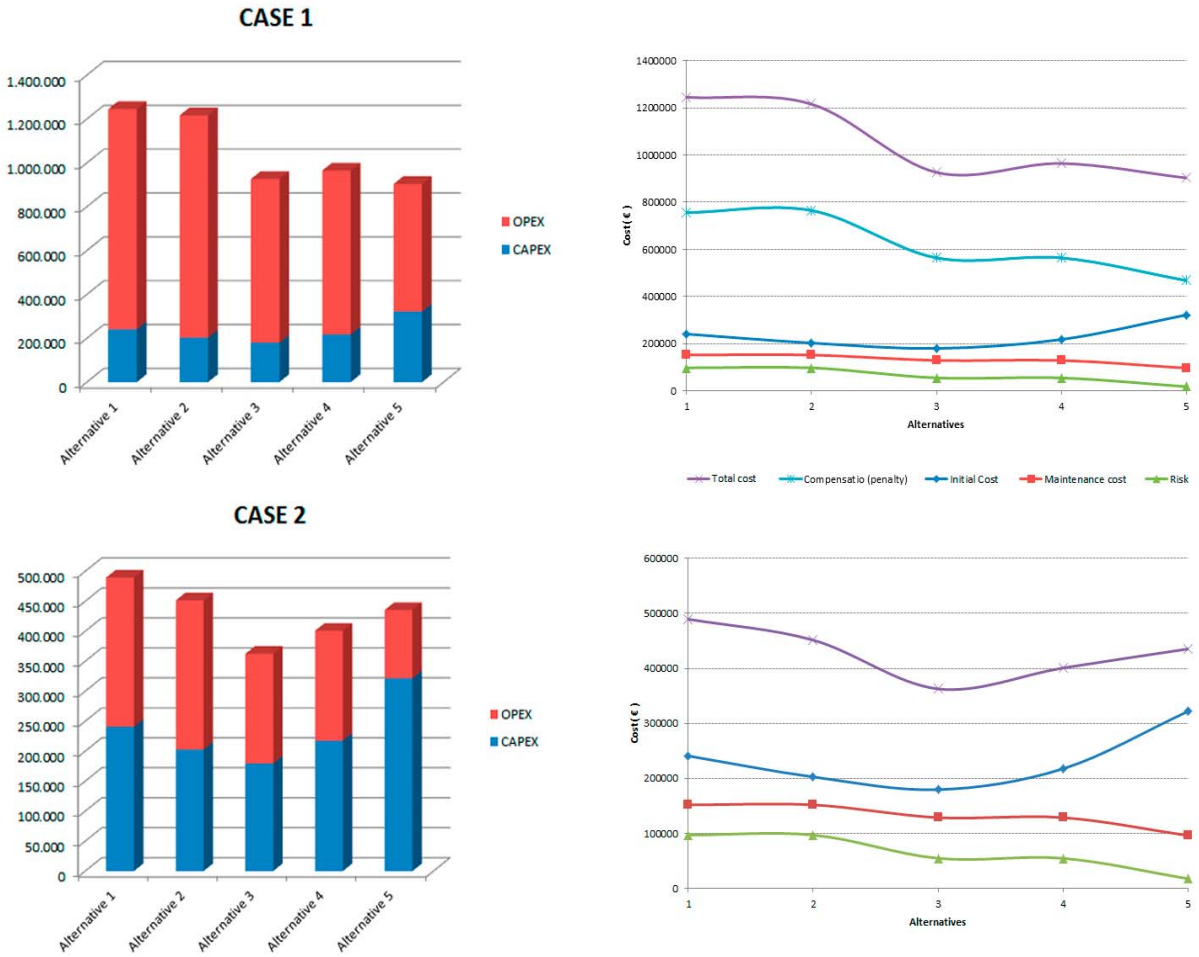


Figura 102: Análisis del coste total de las alternativas.

P11: Elección de la STM+C para el subsistema. Comparación y análisis de alternativas. Influencia de las garantías de desempeño en el proceso de selección.

(a) Caso 1 (Consideración de las compensaciones). El trade-off se realiza sobre la base del coste total, desempeño y la compensación de downtime *(Coste social de indisponibilidad)*. La tabla 20 muestra que la compensación del downtime (penali - zación) tiene un peso importante sobre el coste total de cada alternativa. Se conside - ra que es una buena forma de cuantificar el desempeño, la sostenibilidad social y económica y la efectividad total de una alternativa.

En base al trade-off asociado al caso 1, la mejor elección es la alternativa 5. La tabla 20 muestra que es la de mayor coste inicial, la más económica en el resto de las componentes de coste y la que mejores garantías de desempeño presenta. También es la que presenta mejor comportamiento en la fase de operación (menor mantenimiento y costo de riesgo), y por lo tanto, mejor servicio de cara al usuario (sostenibilidad social) y menos incertidumbre (sostenibilidad económica).

La alternativa 3 está próxima a la 5 en cuanto al coste total (la 3 es un 2.55% superior a la 5); sin embargo, en base a los datos de la tabla 20, su comportamiento en la operación, y por tanto su certidumbre y calidad de servicio, es inferior a la 5.

Las alternativas 1 y 2 son significativamente más caras que las 3, 4 y 5. Ello es debido, en parte, a que necesitan más mantenimiento, lo que se traduce en una mayor indisponibilidad y penalización por downtime (mayor coste social).

La figura 102 también muestra que la alternativa de menor CAPEX no es la de menor LCC total.

Otros dos elementos interesantes para el análisis que surgen al introducir en el trade – off las ecuaciones de compensación (figura 103) son los "datos perdidos (ocultos)" y las "zonas de sombras" asociadas a las siguientes situaciones:

1.- La influencia de los bonus (compensación positiva) en el trade-off LCC vs. proceso de decisión:

Coste Total (€) = [*(1) + (2*) + (3) + (4)*] – *(compensación positiva: bonus)* **(13)**

2.- El efecto sobre el OPEX y la curva de coste total al introducir conjuntamente compensaciones positiva y negativa a la hora de determinar el intervalo de LCC mínimo (figura 103):

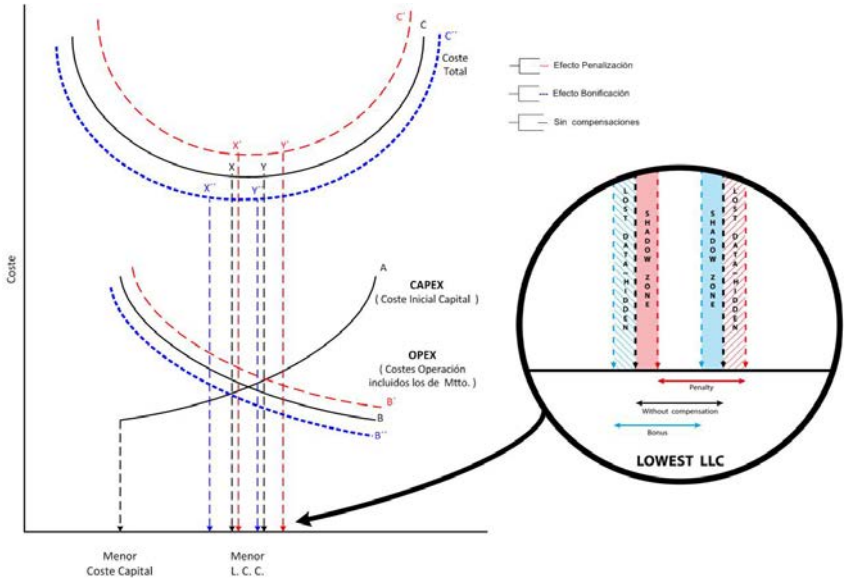


Figura 103: Efecto de los bonus y penalizaciones sobre el intervalo de LCC mínimo vs. proceso de decisión.

(b) Caso 2 *(No se consideran las compensaciones).* El trade-off se realiza sobre la base del coste total y el desempeño. Las compensaciones (factor de sostenibilidad) no son consideradas en este caso como dato en el proceso de decisión.

La tabla 20 muestra que la mejor elección, para el caso 2, es la alternativa 3. Sin embargo, presenta menores garantías de desempeño, peor comportamiento en la fase de operación (mayor coste de mantenimiento y de riesgo), y por lo tanto, peor servicio de cara al usuario y más incertidumbre que la alternativa 5.

La alternativa 3 está próxima a la 5 en cuanto a coste total (la alternativa 5, bajo este análisis, es un 20% superior a la 3); sin embargo, en base a los datos de la tabla 20, su comportamiento en la operación, y por tanto, su certidumbre y calidad de servicio, es inferior a la 5.

La alternativa 3 está próxima a la 4, pero esta última presenta un mayor coste inicial.

Las alternativas 1 y 2 son significativamente más caras que las 3, 4 y 5.

El proceso de selección asociado al caso 2 desplazada al tercer lugar la alternativa 5, a pesar de que presenta mejor comportamiento en la fase de operación y mejores garantías de desempeño. Por tanto, menos incertidumbre y mayor con - fiabilidad.

También introduce una importante distorsión en la diferencia de coste total entre las alternativas 3 y 5 que confunde al decidor.

4. CONCLUSIONES.

El análisis anterior muestra lo que Goldratt, E.M, afirmaba en 1990: un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final; también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de precisión.

En este caso práctico, se compara y discute los resultados del *proceso de selección de la mejor alternativa* del modelo propuesto más recientemente por Ogink & Al-Jibouri (Ogink, G., & Al-Jibouri, S., 2008) para contratos DBM de infraes - tructuras con los resultados del modelo propuesto en la tesis, donde se consideran las garantías de desempeño en el LCCA. Se demuestra que las *garantías de desempeño* tienen una gran influencia en el cálculo de la componente de costo total de todas las alternativas, lo que pone en valor los beneficios de un proceso de decisión bien construido, completo y riguroso, para apoyar los procesos de diseño y selección de alternativas en la fase de adquisición.

Se demuestra con la metodología propuesta que:

a) La alternativa con un mayor costo inicial (alternativa 5) es la alternativa más coste efectiva, y al mismo tiempo, la que mejores garantías de desempeño presenta. También es la que presenta mejor comportamiento en la fase de operación (menor mantenimiento y costo de riesgo); por lo tanto, mejor servicio de cara al usuario y menos incertidumbre.

b) La alternativa de menor CAPEX no es la de menor LCC total.

Otros dos elementos interesantes para el análisis que surgen de la comparación con el nuevo enfoque son los “datos perdidos (ocultos)” y las “zonas de sombras” asociadas a las siguientes situaciones:

1.- La influencia de los bonus (compensación positiva) en el trade-off LCC vs. proceso de decisión.

2.- El efecto de las compensaciones (positivas y negativas) sobre el OPEX y la curva de coste total y el intervalo de LCC mínimo.

Los efectos de adoptar una solución deficiente normalmente surgen en la fase de utilización, lo que podría arriesgar la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión. Por tanto, para reducir los efectos diferidos (económicos, accidentes, etc.) que puedan surgir en la fase de operación debido a errores o imprecisiones en el diseño es importante disponer, en la fase de adquisición, de un modelo para apoyar la toma de decisiones que:

- se centre en un proceso de decisión basado en el riesgo;
- que brinde información relevante, oportuna, clara, fiable y precisa;
- que permita la simulación de escenarios técnico-económicos para poder in - vestigar diferentes alternativas a fin de localizar la mejor equilibrada a nivel de coste total, desempeño y estrategia de mantenimiento, para el ciclo de vida establecido.

Se propone, en base a las conclusiones anteriores, que las garantías de desempeño, y sus ecuaciones de compensación:

1. sean definidas de forma detallada y consensuada en las fases de oferta y otor - gamiento de contratos.
2. Sean incluidas en el proceso de decisión y selección de la mejor alternativa en la fase de adquisición.
3. Sean usadas para transferir los costes/beneficios diferidos de una STM sobre

el contratista y minimizar los impactos sobre el cliente.

4. Sean consideradas para cuantificar económicamente la *efectividad total* de una STM+C y su nivel de sostenibilidad.

Su uso induciría tres efectos positivos:

A. Un incentivo financiero para el contratista para la mejora del nivel de los requisitos de las Especificaciones de Funcionamiento (fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad, seguridad, otros) y la reducción de los efectos diferidos (económicos, accidentes, etc.) asociados a errores en el diseño o la toma de decisiones en la fase de adquisición = *seleccionar el mejor proyecto global.*

B. Mejor servicio general para los usuarios.

C. Un cambio cultural para introducir un modelo que haga hincapié en un proceso de decisión basado en el riesgo y la asignación de consecuencias.

Otras conclusiones extraídas del estudio son:

- Los contratistas y proyectistas tienen muy poco conocimiento y les falta experien - cia sobre cómo estimar los costes de operación y mantenimiento debido al hecho de que no existe información (bases de datos) sobre la degradación de los materiales utilizados. Normalmente hay que recurrir a conocimiento experto (método empírico).

Una base de datos, robusta y actualizada, es necesaria para el buen funcionamiento de un sistema de gestión de firmes.

- También queda reflejado que el desconocimiento y la falta de experiencia en el uso de las técnicas RAMS y LCC les impide calcular el desempeño de sus diseños.
- El desequilibrio existente entre los Costes de Adquisición y Sostenimiento demuestra claramente la conveniencia de implicar/comprometer al personal que gestiona el mantenimiento en las etapas iniciales de concepción y diseño.
- Dado que una carretera es una infraestructura para la sociedad, en el análisis eco - nómico se considera clave tener en cuenta el "*coste de la indisponibilidad de uso*". Se ha denominado *coste social de indisponibilidad, o de no disponibilidad,* y viene representado por el tiempo que se tarda en hacer reparaciones y mantener una ins - talación.
- En el análisis de las diferentes alternativas es importante la búsqueda equilibrada de una forma soportable, viable y equitativa de la sostenibilidad en sus tres ámbitos fundamentales: el económico, el social y el medioambiental.
- Las actuaciones de conservación de carreteras, aún pareciendo de importancia secundaria respecto al proyecto y ejecución, ocupan un lugar fundamental en el desarrollo económico y social de un país. Por ello, es altamente recomendable la definición y elaboración de la estrategia de conservación desde el momento de proyecto logrando, de este modo, si la estrategia es buena, una prolongación de la vida con un menor coste.

CASO 2: CONTRATO DE MANTENIMIENTO Y OTORGAMIENTO DE GARANTÍAS DE "PROYECTO PARA SUMINISTRO, EJECUCIÓN Y EXPLOTACIÓN DE UN PARQUE EÓLICO". PROCESO DE DECISIÓN PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL DISEÑO Y LA SELECCIÓN DE LA STM+C.

El estudio de las bases de un "concurso" para la adjudicación de un proyecto / contrato tiene como objetivo, en el supuesto práctico más habitual, la búsqueda de la "mejor solución" coste efectiva que satisfaga un conjunto de criterios relevantes vinculados a la toma de decisiones (criterios de decisión: garantías, requisitos del cliente, emplazamiento, costes, otros).

En el problema de ingeniería considerado, el analista, tanto en la Fase Inicial (Nivel 1) como en la posterior (Nivel 2), ha de tratar con un problema MCDM complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones y con objetivos normalmente en conflicto. En este contexto, la toma de decisiones informada en el nivel 1 es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos en un entorno complejo y de alta competitividad como el actual; ello hace el caso seleccionado apropiado para aplicar la metodología propuesta.

En este tipo de contratos se suelen distinguir dos figuras ("Partes") básicas que negocian un "Acuerdo Contractual" para el diseño, suministro, construcción y puesta en marcha del parque eólico:

1. El "Cliente" (propietario del parque). Persona física, o jurídica, que realiza la inversión y exige un retorno y rentabilidad económica de la misma en un horizonte temporal determinado. Establece las bases del concurso.
2. El "Contratista". Persona, normalmente jurídica, que se compromete a cumplir las condiciones del contrato; estas se suelen centrar en los siguientes puntos:

(a) Ejecución de la ingeniería, compras, construcción, pruebas y puesta en marcha del parque.

(b) Asumir, en relación con el Proyecto, la obligación de realizar determinados trabajos y otorgar determinadas garantías que se recogen en el Contrato de Mantenimiento, o el de Suministro.

Se plantea en este caso la construcción de un modelo para la definición, diseño y selección, de forma estructurada y base científica, del espectro de Soluciones Técnicas y de Operación y Mantenimiento Coste-efectivas (*STM+C(i)*) al Concurso para Contrato de Mantenimiento y Otorgamiento de Garantías del " Proyecto para suministro, ejecución y explotación de un parque eólico".

La aplicación del proceso de decisión desarrollado en este trabajo de tesis al supuesto práctico considerado, muestra la validez e importancia del modelo en la reducción de las penalizaciones económicas asociadas a imprecisiones en el diseño y las asociadas a imprecisiones o errores en la negociación.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

El caso planteado está en la órbita de los nuevos "contratos integrados", tales como D&C (Design & Construct), DBM (Design & Built & Maintain) y DBFM (Design, Build, Finance and Maintain), donde el contratista asume responsabilidades, no sólo de proyecto, sino también de construcción, mantenimiento y financiación. En este tipo de contratos, los clientes suministran pocas especificaciones al diseño del proyecto para permitir al contratista la libertad de innovar y elegir la STM adecuada que satisfaga los requisitos contractuales, o las "Especificaciones de Funcionamiento" (functional performance requirements: Curva de Potencia Garantizada *(CPG)*, Dispo-

nibilidad Máxima Garantizada *(GMA)*, Eficiencia del Proyecto *(E.P.)*, disponibili - dad contractual, otras). Como contrapartida, el acento se pone sobre las "garantías de desempeño", entorno a las cuales se hace pivotar las condiciones del contrato.

En este contexto, donde el análisis de las "garantías de desempeño" es muy importante, tanto en la fase de concurso como de adjudicación, resulta fundamental que el analista (contratista) disponga de una metodología que le permita investigar e innovar, sobre diferentes alternativas de diseño, para seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre los requerimientos asociados a la "componente de valor" y la "componente de coste total", sobre el ciclo de vida fijado.

Otros resultados para este caso serían: el apoyo informado en el diseño de la estrategia de negociación en la fase de perfeccionamiento del contrato con el cliente (fase de adjudicación); la reducción de la incertidumbre (del coste y de los niveles de eficiencia y efectividad de la solución STM seleccionada); y la minimización del impacto de STM+C sobre el cliente final.

Se trata de un problema complejo de optimización multiobjetivo (POM).

La información básica necesaria para apoyar la toma de decisiones sería:

(a) Validación del emplazamiento (Affordability analysis).

(b) Opciones STM(i) (gama de alternativas) en base a las condiciones de reali - zación del mantenimiento del proyecto: evaluación de acciones, recursos y materiales para las diferentes configuraciones.

(c) GMA para cada periodo de producción y CPG estimada para las diferentes alternativas.

(d) Análisis del coste total *($C_{Total}(i)$)*: *Coste (i) = f (STM(i), GMA(i), CPG(i)).*

(e) Alternativas STM+C(i) en función de los "Requisitos del Cliente" y estrate - gias de negociación.

Será necesario definir el vector de funciones objetivo, *f(x).* Para cada *i* – alterna - tiva las componentes básicas serían:

f(x) = { Disponibilidad contractual(i); Costes(recursos para el nivel de Disponibilidad contractual(i); Compensaciones(i); incremento de riesgo) }.

Además, se ha de definir el vector de restricciones *g(x)* y el rango de variación admisible de las variables de decisión vinculadas. Para el supuesto práctico más habitual, las componentes más frecuentes están relacionadas con el emplazamiento, el presupuesto asignado (Precio Contractual del Proyecto y Precio Básico Mensual), **r**estricciones a la subcontratación**,** restricciones legales y de mercado regulado**,** ga - rantías.

2. PREMISAS DEL ANÁLISIS.

El objetivo de cualquier estrategia de Mantenimiento, y especialmente para la mayoría de las industrias de proceso continuo, dentro de las cuales se encuentra los parques eólicos, debería estar encaminado a reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos. Por tanto, los costes de O&M son elementos claves para la viabilidad económica de un parque eólico. Tanto la instalación ("hard": turbinas, subestación), como los procesos de operación y mantenimiento ("soft") vinculados a la solución, han de estar sujetos a un proceso de optimización con objeto de minimizar las "pérdidas" y maximizar el ROI. El analista (Contratista), tanto en el Nivel 1 (Diseño) y Nivel 2 (Operación), frecuentemente ha de tratar con un problema complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones (Emplazamiento del Proyecto; Precio Contractual del Proyecto y Precio Básico Mensual; Garantías; otras)**,** y con objetivos

normalmente en conflicto (maximizar la energía eléctrica disponible y la disponibili - dad; minimizar el downtime; etc.).

En este contexto, la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos en un entorno de alta competitividad como el actual.

Una de las líneas abiertas en la investigación relacionada con la Gestión del Mantenimiento es el desarrollo de modelos que ayuden a la toma de decisiones de forma estructurada y base científica. El propósito es brindar la posibilidad de realizar una gestión más científica que permita el "reemplazo" de decisiones soportadas casi exclusivamente por criterios subjetivos por decisiones más objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos.

2.1. Objetivos.

Son interesantes, en la fase de diseño, los procesos de optimización para garan - tizar el máximo beneficio, en la fase de operación; permiten mejorar la eficiencia del sistema y alcanzar la máxima efectividad, "productividad real neta" y el máximo ROFA *(Return On Fixed Assets)* en la fase de operación.

Dos objetivos básicos:

(a) Definición de soluciones STM+C.

(b) Apoyar la toma de decisiones en:

- El Estudio de la Rentabilidad económica del concurso en el horizonte tempo - ral establecido (normalmente relacionado con el periodo de garantía).
- El Diseño de la Estrategia de Negociación, en la fase de perfeccionamiento del contrato, de los términos críticos que son negociables y sobre los cuales existe capacidad de actuación; básicamente, GMA, CPG, Garantías y Compensaciones.

2.2. Alcance.

El alcance viene determinado por los Trabajos de Mantenimiento. Comprenden los servicios y obligaciones que tiene que realizar el Contratista según lo establecido en el Contrato de Mantenimiento de acuerdo con los "Requisitos del Cliente". Para cumplir con este requisito, el Contratista debe, con objeto de tener una descripción de los detalles del alcance y condiciones del trabajo, realizar los siguientes estudios:

(a) Validación del emplazamiento (Affordability analysis). Determinación de la E.P.

El emplazamiento para la construcción del proyecto, en el supuesto práctico más habitual, representa una restricción al dominio de la solución. Su análisis es impor - tante para evaluar la eficiencia de la solución técnica propuesta.

(*) Esto siempre se realiza en la fase previa de un proyecto; es anterior a la firma del contrato de suministro y O&M. Si el emplazamiento no ha sido validado (tanto por el cliente como por el suministrador de la turbina), se desecha el proyecto.

(b) Evaluación de las Condiciones de Realización del Mantenimiento del Proyecto.

Estimación de acciones, restricciones (legales, medioambientales, etc.), recursos y materiales para las diferentes configuraciones. Definición de opciones (gama de alternativas STM).

Entre dichos Trabajos de Mantenimiento se suele incluir, aunque no de forma exclusiva, la realización de las siguientes actividades:

- Mantenimiento Programado (M.P.) y Mantenimiento no Programado de to - das las infraestructuras del Proyecto.
- M.P. y Mantenimiento no Programado de los Aerogeneradores (incluyendo la adquisición de consumibles y todas las piezas de recambio necesarias).
- Monitorización 24 x 7 días de los Aerogeneradores.

- Inspección y/o limpieza de palas (Esto es un tema opcional, en la mayoría de los contratos, dado que no es muy importante en las turbinas de paso variable, y sí, en las que controlan potencia por entrada en pérdida aerodinámica. Estas últimas prácticamente ya están fuera del mercado. Lo que sí se oferta actualmente es la inspección de las palas).

(c) Evaluación de la GMA (%) para cada periodo de producción y la CPG estimada para las alternativas STM(i).

(d) Estimación de los Costes totales para las i - alternativas ($C_{Total}(i)$).

(e) Determinación de la gama de alternativas STM+C y estrategia de negociación en función de las restricciones y "Requisitos del Cliente".

2.3. Elementos necesarios para el análisis.

• *Proceso de modelizado del sistema.* En general, el sistema puede ser modelizado desde diferentes puntos de vista: disponibilidad, mantenibilidad, fiabilidad, logística, riesgo, error humano, etc. Para las industrias de producción continua e intensivas en capital, la disponibilidad y la mantenibilidad representan los más relevantes "con - ductores de costes" en el análisis. Dado que el uptime de los equipos es clave en la estrategia de operación, la disponibilidad se convierte en uno de los principales objetivos de la gestión del mantenimiento.

• *Modelización de la disponibilidad.* Su definición y formulación dependerá de los elementos que se decidan incluir en el análisis del uptime y downtime. Su modeliza - ción suele ser un problema complejo dado que hay que considerar muchos aspectos: distribución del fallo y del tiempo de reparación, mantenimiento preventivo, retrasos (en los suministros, en el mantenimiento, etc.). Consideraciones acerca de las diferentes formas de medir la disponibilidad son discutidas en Keeter, B. (2002).

El hecho de que existan diferentes formas de medir la disponibilidad exige la búsqueda de definiciones de consenso entre las partes, lo requerirá el uso de técnicas semicuantitativas. Para el caso en estudio, habrá que considerar los términos de *disponibilidad inherente* (parámetro de diseño del equipo: nivel 1); *operacional* (vinculada a la efectividad y eficiencia de las operaciones de mantenimiento); y *contractual* (a caballo entre la inherente y la operacional).

• *Los datos*. Es necesario una amplia variedad de datos (de fiabilidad, de operación, costes, otros). Es relativamente fácil encontrar fuentes disponibles al público de datos de fiabilidad. Lo difícil es para los "datos sensibles" de operación y costes.

• *La exactitud de los datos*. Es crucial para mejorar la certidumbre de la pre - dicción y el diseño del sistema. Previamente hay que definir, con precisión, los datos de entrada y sus requerimientos. Los cálculos estarán basados frecuentemente en costes de funcionamiento de equipos similares con historial de uso.

• *Construcción de la Gráfica del Perfil de Costes (figura 1)* para el ciclo de vida total del sistema. Es un proceso esencial del análisis. Permitirá la evaluación, a nivel financiero, de cada diseño con la referencia tomada como base (línea de referencia).

Figura 104: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo.

• *Enfoque multidisciplinar.*
• *Identificación de los conductores de costes que tienen impacto sobre el LCC total y sus relaciones causa - efecto.* Son claves para orientar las acciones de mejora coste efectivo y la generación de alternativas STM+C.
• *Proyección de los "Costes de Propiedad".* Es necesario un estudio exhaustivo para conocer los principios de funcionamiento del sistema; ello permitirá identificar las categorías y la estructura de costes significativos con objeto de que el LCC cumpla con las funciones que se le exige.
• *Análisis de riesgo (PRA_Probabilistic Risk Assessment y RPN-teórico).* El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incertidumbre de la decisión.
• *Proceso de optimización.* En un sentido amplio, buscar el conjunto de paráme - metros que minimicen el LCC del sistema total; en un sentido más estricto, la optimización puede ser aplicada a actividades específicas (optimización del diseño, del mantenimiento, de los repuestos, entre otras) que orientarán futuros proyectos de BPR, Reingeniería de organización o Reingeniería de procesos.
• *Búsqueda de diseños óptimos y no solamente adecuados.*

2.4. Filosofía de operación.

El objetivo es mejorar el nivel de competencia de la planta/sistema mediante la búsqueda de alternativas STM+C, altamente optimizadas, para el equilibrio dinámico sistema – entorno.

2.5. Elementos de coste.

Una categoría de clasificación común para las plantas de producción de energía, gas o petróleo, es la siguiente: "Costes de adquisición", "Costes de operación" y "Costes diferidos de producción". Esta última hace referencia a la penalización esta - blecida por incumplimiento de las condiciones de suministro establecidas en contrato. Su cuantificación se hace generalmente en base a la indisponibilidad de funciona - miento del sistema de producción y una unidad de coste del producto. Puede tener un impacto importante sobre el LCC si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Es una categoría muy importante para este tipo de industrias y tiene un peso importante sobre el coste total de cada alternativa.

2.6. Ecuaciones del sistema.

El Contratista-analista se enfrenta a un problema MCDM en el proceso de búsqueda de soluciones coste efectivas (gama de alternativas) que satisfagan, bajo las restricciones consideradas (atributos del emplazamiento, presupuesto, etc.), unos niveles de garantía. Hay tres elementos básicos sobre los que debe pivotar el proceso de integración de la toma de decisiones:

- las especificaciones técnicas de diseño y la planificación de la O&M;
- la disponibilidad contractual + costes;
- las garantías.

El compromiso contractual de un nivel de garantías lleva asociado unos costes, los cuales serán mayores cuanto mayores sean los niveles exigidos o comprometidos contractualmente. Los costes vinculados a un determinado nivel de garantías se obtendrán sumando las diferentes contribuciones (coste del riesgo, gastos de recur - sos en mantenimiento, otras). Por tanto, para el problema de optimización multiobje - tivo considerado, es importante tener una formulación detallada de las garantías.

Los motivos básicos son:

(a) han de ser consensuadas y aceptadas por las "Partes".

(b) Son la base para cuantificar los riesgos económicos por penalizaciones (Cos - tes diferidos de producción). Las penalizaciones por compensación del downtime tienen un peso importante en el coste total de cada alternativa.

(c) Representan un criterio relevante de decisión para definir los atributos de las alternativas. Por tanto, contribuyen, de forma importante, a la determinación de los candidatos a actuar como variables de decisión en el proceso MCDM.

(d) Representan una buena forma de medir económicamente la efectividad total de una alternativa y de cuantificar su desempeño.

(e) Es un buen indicador del nivel de sostenibilidad económica de una alternativa.

3. FUNDAMENTOS PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA DE ALTERNATIVAS. FACTORES DE DISEÑO.

La rentabilidad económica de la inversión necesaria para la construcción y la operación de un parque eólico depende de tres factores principales: la inversión ini - cial, los costes de operación, y el retorno por la venta de la energía eléctrica generada.

Los proyectos de energías renovables son típicamente intensivos en capital, por lo que las decisiones de inversión suelen estar precedidas por un análisis extensivo de su potencial atractivo .En Sousa de Oliveira, et al. (2011) se discuten los principales métodos para la evaluación económica de una inversión en la industria energética.

Una panorámica de los principales factores que inciden en el proyecto y explotación de una instalación eólica, y que por tanto, hay que considerar en su diseño, puede verse en Bansal, R.C, et al. (2002), Jenkins, N. (1993(a) y (b)), Jonhson, G.L., Walker J.F., et al. (1997).

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO I+I+D PARA LA DEFINICIÓN, CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS. PROCESO DE DECISIÓN PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL DISEÑO Y LA SELECCIÓN DE LA STM+C.

La dinámica y complejidad de los mercados exige un alto nivel de competitividad a través de una elevada capacidad de respuesta. Sin embargo, las compañías afrontan severas dificultades para adoptar un enfoque estructurado a la hora de diseñar, rediseñar o reestructurar sus plantas productivas. Disponer de la máxima información posible de forma oportuna, clara, fiable y precisa, y tener la posibilidad de disponer de un kit de herramientas que permita simular escenarios de actuación técnico - económicos contribuiría a reducir los errores, y por tanto, los costes diferidos vinculados a equivocaciones o imprecisiones en la toma de decisiones, en la fase de adquisición, que pueden poner en riesgo la sostenibilidad de la inversión/proyecto en la fase de operación/explotación.

Se propone como elementos claves del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C con objeto de garantizar *"óptimos dinámico absolutos"* y un nivel de competitividad sostenible en el tiempo: el análisis de las garantías de desempeño para cada alternativa, la construcción de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonificaciones), el análisis de escalabilidad (para adaptar la evolución del sistema a las disponibilidades de presupuesto y las demandas dinámicas del mercado) y el LLCA-dynamic (basado en el análisis de riesgos: R-LCC $_{(Risk\text{-}LCC)}$).

El objetivo principal del modelo es brindar al analista una herramienta para dos fines básicos:

a) investigar, comparar , innovar y diseñar Soluciones Técnicas, y de O&M, mediante un proceso de *"anidamiento de óptimos"*.

b) Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total, para el ciclo de vida considerado.

Este caso se centra en la formulación de las garantías y las ecuaciones de compensación negativa por su influencia en el diseño y el coste total de cada alternativa.

Por tal motivo, el desarrollo del caso se centra en la fase 2 *(Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas).*

4.0. Benchmarking: Etapa de Investigación (I).

Con objeto de que la STM seleccionada cumpla con las funciones (a nivel técnico y económico) que se le exigirá a lo largo del ciclo de vida, es necesario realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar para determinar y conocer los principios de funcionamiento, identificar las categorías y la estructura de costes significativos, la/s causa/s raíz de los modos críticos de fallos potenciales, etc.

La adopción, de forma conveniente, de las mejores prácticas, ayudará a construir diseños adaptados, más confiables, de mejor calidad y más coste efectivos en O&M.

La finalidad de las conclusiones recogidas en este apartado es servir de base para el debate y la discusión a nivel técnico del diseño de las alternativas.

El objetivo de la ingeniería (bajo el paraguas del ciclo de vida: enfoque concurrente) ha de ser el asegurar que el ciclo de vida total del sistema sea considerado desde el principio. Este enfoque ha de integrar todos los factores necesarios (desempeño, productividad, fiabilidad, mantenibilidad, factor humano, soportabilidad, calidad, otros) para brindar, en función de las necesidades identificadas, opciones de diseño viables y sostenibles en el tiempo. Esta orientación, o diseño concurrente, lleva aparejado la convivencia del ciclo de vida del sistema técnico con el ciclo de vida de su sistema soporte.

Del análisis realizado para la concepción y planteamiento del sistema y subsistemas, será importante tener en cuenta los siguientes aspectos específicos del proyecto:

a) *Planificación.* Buscar oportunidades de innovación para avanzar con relación a las soluciones existentes, adaptadas a circunstancias específicas de evolución, de costes de materias primas, dependencia externa, aspectos sociales, etc.

b) *Proyecto :* emplazamiento, Distribución de Viento Nominal (DVN), Factor de Layout (F.L.), Factor de Planificación (P.F.), Eficiencia Total, CPG, E.P., etc.

c) *Ejecución.* Hay que analizar el nivel tecnológico, el equipo humano, nivel de coordinación de los agentes que intervienen, etc., para cada alternativa.

d) *Materiales.* Buscar soluciones que utilicen recursos locales no importados (mayor independencia estratégica); análisis de prestaciones funcionales, etc.

e) *Control de calidad.* Verificar los controles exigidos a cada alternativa.

f) *Mantenimiento.* Identificar las diferencias apreciables en las políticas de gestión del mantenimiento para cada alternativa.

g) ***Sostenibilidad.*** Reflexionar desde una perspectiva más amplia para ayudar a valorar las alternativas, incorporando, no sólo los aspectos ambientales y sociales, sino también los económicos derivados de las alternativas planteadas.

Dada la creciente relevancia del tema, es cada vez más frecuente el uso de un análisis amplio de la sostenibilidad en diversos sectores.

Los datos aportados hay que entenderlos como una referencia para ayudar al técnico en el análisis de la decisión, debiéndose contrastar con datos provenientes de otras fuentes; hay que resaltar, a este respecto, la importancia de definir, de forma

precisa, los límites del sistema en el caso de querer hacer una evaluación (compara - ción) de forma directa.

Uno de los factores críticos del éxito en la aplicación de este proceso es evitar la transferencia directa de las mejores prácticas (copia) sin una adaptación previa a las especificidades del sistema en proyecto (copia vs. adaptación). Por este motivo, se propone los siguientes cinco pasos para la definición del plan estratégico de mejora en la fase de diseño del sistema (figura 105):

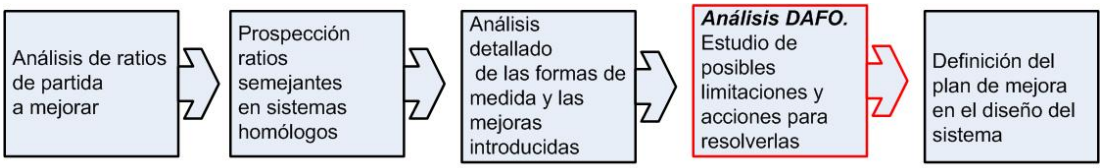


Figura 105: Esquema conceptual para la definición por comparación homogénea del plan de mejora propio en base a restricciones.

Las etapas básicas del proceso, con especial énfasis en la gestión del mantenimiento, serían las recogidas en el Anexo I del presente trabajo de tesis.

4.1. Fase de diseño conceptual. Arquitectura del sistema: definición del P.F. y planificación de la O&M.

En esta fase se define la configuración inicial del sistema a nivel abstracto *(Etapa de Innovación(I))*. Actúa como marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M.

La definición rigurosa y realista del *Factor de Planificación (P.F.)* es importante para la valoración de la rentabilidad de la inversión. La atención debe centrarse en la definición de la estrategia de O&M que minimice el downtime y maximice la "disponibilidad técnica" por su influencia directa y positiva sobre los ingresos y el beneficio.

El problema de minimización del downtime es complejo dado que depende de muchos factores: velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capa - cidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambientales. Es importante pues, una acertada planificación de la O&M.

Por tanto, la E.P., el P.F., y la estrategia de O&M, han de ser definidos en la fase de diseño para la identificación de la mejor solución STM que haga económicamen - te rentable la inversión, en la fase de operación, y garantice un nivel de competiti - vidad sostenible.

Se realizaría el análisis de necesidades, los requerimientos, a nivel operativo y de mantenimiento del sistema, y los estudios de viabilidad.

4.1.-1. Claves para la mejora de la rentabilidad económica de un parque eólico. Factores críticos para el diseño de soluciones técnicas y de O&M coste efectivas.

Varios estudios japoneses (relacionadas con el TPM) muestran que las pérdidas vinculadas a la eficiencia son mayores que las pérdidas vinculadas al downtime. Sin embargo, la eficiencia ni se registra ni se controla. Una forma de controlar esta variable sería a través de la utilización combinada de datos de mantenimiento con datos financieros, lo que contribuiría a identificar y resolver problemas crónicos que afectan negativamente al ROFA de un sistema. El ROFA es un indicador utilizado en la planificación estratégica de los activos físicos de una instalación. El objetivo es producir con menores costes que la competencia para mejorar el nivel de competiti - vidad y favorecer la captación de clientes e inversores.

En consecuencia, es importante considerar que la productividad no sólo puede ser influenciada actuando sobre la efectividad, sino también, sobre la eficiencia (fase de diseño).

Por tanto, el programa para la mejora de la rentabilidad económica de un parque eólico debería estar centrado sobre la mejora de su Eficiencia y Efectividad.

Tam y Price (2008a) consideran que existen tres dimensiones críticas en el proceso de toma de decisiones para optimizar la planificación del mantenimiento: dimensión salida, riesgo y recursos. Para la gestión de los activos vinculados a un parque eólico, quedan definidas del siguiente modo:

a) Dimensión salida: Esquema energético de un parque eólico.

Un parque eólico, en base a la definición general input/output utilizada para la descripción de los procesos de fabricación (Wauters J, Mathot J.), está formado por una instalación en la que se realiza un proceso de conversión de energía mecánica (entrada (input) = viento) en energía eléctrica (salida = output) para exportar a la red.

Las componentes básicas del esquema energético serían:

- *Energía eléctrica de referencia: Entrada (Input) de referencia (E_{ref} (parque)).*

Representa la energía máxima que teóricamente podría ser exportada a la red en el punto de conexión si no existieran pérdidas o interrupciones. Será función del nú - mero de aerogeneradores (NAG), el tipo de Convertidor seleccionado (WEC) y la Distribución de Viento Nominal (DVN):

$$E_{ref}\,(park) = \sum_{i=1}^{N} E_{tot(i)}\,(WEC) \quad \textbf{(14)}$$

- *Energía eléctrica teórica: Salida (Output) de referencia (E_{teor} (parque)).*

El *emplazamiento* para la construcción del proyecto suele pertenecer, en el supuesto práctico más habitual, al dominio de la solución (restricción). Su análisis (*Validación del emplazamiento*) es importante para evaluar, en función a las carac - terísticas del mismo (orográficas, geotécnicas, de acceso, lindes, distancia a la subestación de conexión a la red de distribución, DVN, etc.) la eficiencia de la solución técnica propuesta, y por tanto, la energía de referencia a la salida *($E_{teor.}$ (parque))*. Un término crítico de este análisis es la determinación de la "*Eficiencia del Proyecto (EP)*" para la solución propuesta. Este valor lo establece el Contratista en % (ámbito de la negociación del Contrato de Mantenimiento) y se caracteriza a través del denominado *Layout Factor (LF)*. Aparece como factor en las fórmulas de energía y de disponibilidad en el cálculo de compensaciones. Es un Factor Corrector por el que la producción energética de referencia se reduce debido al:

- *"Efecto parque"(Eficiencia del parque(η_{parque})*: pérdidas debidas a la distri - bución de los aerogeneradores, etc.).
- *Las pérdidas en la red eléctrica del proyecto (Eficiencia eléctrica ($\eta_{el.}$):* pérdidas eléctricas en cables y dispositivos dispuestos "aguas abajo" de los WECs hacia el punto de conexión a red.

Por tanto:

$$E_{teor.}\,(parque) = E_{ref.}\,LF = E_{ref.}\,\eta_{parque}\;\eta_{el.} \quad \textbf{(15)}$$

- *Energía eléctrica disponible ($E_{dispon\,(parque)}$).*

Representa la *Producción Energética Neta anual* disponible por año para ser exportada a la red. Se obtiene restando a la $E_{teor\,(parque)}$ las pérdidas de producción asociadas al *downtime planificado*. Estas pérdidas, debido a su naturaleza, son deno - minadas *"pérdidas externas"*. Se planifican en la fase de diseño y formalmente se recogen y contabilizan en el denominado *Factor de Planificación (PF):*

$$E_{dispon.}(parque) = E_{teo.}(parque)\,PF = E_{ref.}(parque)\,\eta_{parque}\;\eta_{el.}\,PF \quad \textbf{(16)}$$

Se define la *Eficiencia Total (η)* del parque como un factor que incluye las pérdidas que son contempladas en la fase de diseño (fases de ingeniería y planifica - ción de O&M):

$$Eficiencia\,(\eta) = LF\;PF = \eta_{parque}\;\eta_{el.}\,PF \quad \textbf{(17)}$$

- *Energía exportada o activa (E_{valor} (parque)).*

La energía eléctrica disponible no es completamente exportada a la red debido, básicamente, a las denominadas *"pérdidas técnicas"*. La energía activa o exportada es la que se recoge en factura (finalmente vendida). Por tanto, es la que indica la productividad real del parque. Justifica los ingresos (Valuable electrical energy) y la rentabilidad de la inversión.

La productividad del parque *(p < 1)* se verá afectada por las pérdidas energé - ticas vinculadas a los problemas técnicos que puedan aparecer en los procesos de operación y mantenimiento. Por tanto, la energía realmente exportada dependerá de la eficiencia de la instalación *(η **:** Fase de diseño)* y la productividad de los procesos de O&M (*Efectividad: Fase de operación*):

$$E_{valor}(parque) = E_{dispon.}(parque)\;p = E_{ref.}(parque)\,\eta\;p \quad \textbf{(18)}$$

La figura 106 muestra el esquema energético de los procesos de un parque eólico. En ella se recogen los factores críticos que han de tenerse en consideración para el diseño de soluciones coste efectivas (gama de alternativas STM) al proyecto de ejecución y explotación de un parque eólico, tanto en la Fase de diseño (Concurso) como de O&M (Adjudicación).

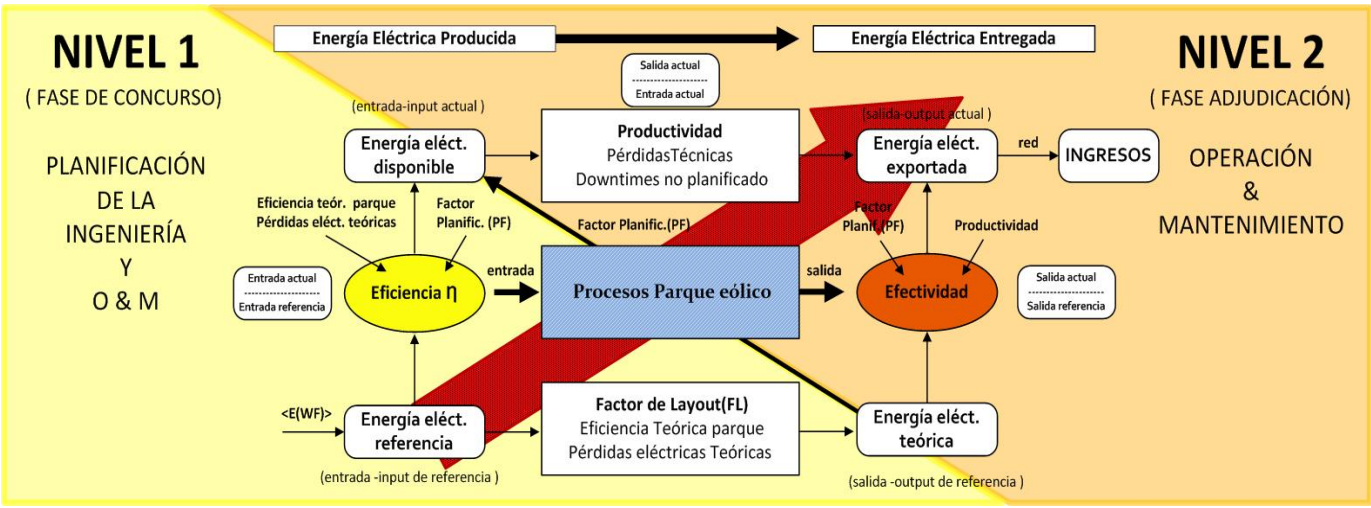


Figura 106: Esquema energético de un parque eólico. Mapa conceptual para el diseño y la planificación de la O&M. (Adaptado de Krokoszinski, H-J., 2003)

El esquema define claramente la responsabilidad en cada nivel y la influencia de las áreas de Ingeniería y Planificación de la Operación *(Nivel1)*, y Operación y Man - tenimiento *(Nivel 2).*

Una vez el parque es construido, las posibilidades de mejorar la producción energética de referencia y la teórica son nulas, pues en los trabajos de ingeniería las turbinas y el emplazamiento ya han sido "seleccionados" y fijado el *LF* ($\eta_{parque}, \eta_{el.}$) En base a esta restricción, y a partir de la definición del *PF* en la ingeniería y la fase de planificación de la O&M, se valora la producción energética disponible. La definición realista y detallada de este factor es importante para la valoración de la rentabilidad de la inversión. La atención debe centrarse en la definición de la estrategia de O&M que minimice el downtime y maximice la "disponibilidad técni - ca", y por tanto, los ingresos. Se deben utilizar técnicas "semicuantitativas" que per - mitan:

1. Consenso tecnólogo - propietario - contratista.
2. Un análisis estructurado y detallado del problema con base científica.

Por tanto, el *LF*, el *PF*, y la estrategia de O&M, han de ser definidos en la fase de diseño *(Nivel1)* para facilitar la identificación de la mejor solución STM que haga económicamente rentable la inversión.

Las paradas planificadas (recogidas en el PF) están en la frontera entre la ingeniería y la fase de planificación de la O&M. Ello dará la posibilidad al Contratista de reducir las pérdidas energéticas vinculadas a las mismas a través de una acertada definición de la estrategia de O&M.

Para favorecer este análisis sería interesante un método que permita la definición estructurada de alternativas, la definición de los parámetros críticos para su gobierno en la fase de operación y mantenimiento y la definición, evaluación y comprensión de la estructura desagregada de costes asociada a cada alternativa.

b) Dimensión riesgo: Pérdidas externas y técnicas en un parque eólico.

De acuerdo con la teoría general de procesos de producción (Wauters J, Mathot J.) las pérdidas (externas y técnicas) pueden ser clasificadas en función de las causas que las producen: pérdidas por downtime, por velocidad y por calidad.

La figura 107 muestra el efecto de las pérdidas sobre el tiempo de producción teórico y el tiempo de producción disponible:

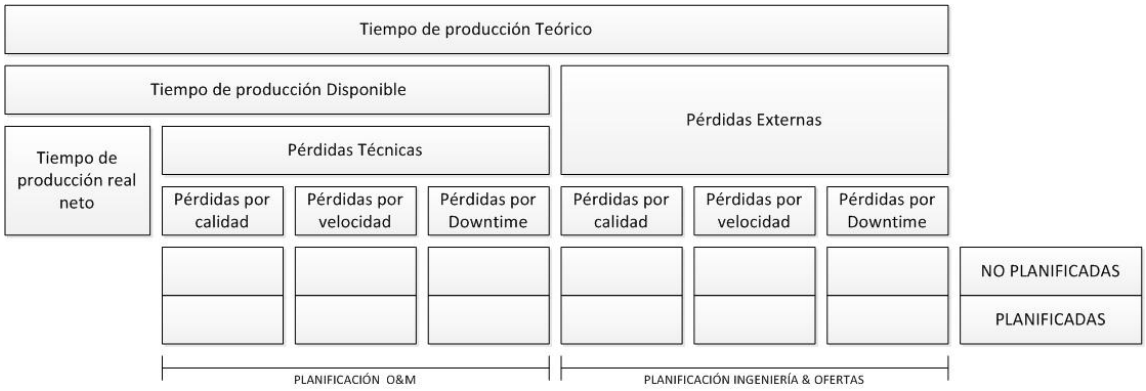


Figura 107: Matriz de evaluación de los tiempos de producción.

De la figura anterior se extraen las siguientes relaciones de interés:

Tiempo de producción Disponible = Tiempo de producción Teórico – Pérdidas externas **(19)**

El *Tiempo de producción Disponible* es responsabilidad de producción y mantenimiento. Se verá afectado por las pérdidas causadas por los procesos o malfunciona - miento de las máquinas; esto es, por las denominadas "pérdidas técnicas".

Tiempo de producción real neto = Tiempo de producción Disponible – Pérdidas técnicas **(20)**

La expresión (19) muestra que el *Tiempo de producción Teórico* se ve afectado por las denominadas *Pérdidas externas*. Estas pérdidas tienen gran importancia a nivel estratégico, y por tanto, para la Alta dirección. Han de ser examinadas con rigurosidad y nivel de detalle pues las decisiones orientadas a su reducción influyen directa, y positivamente, en el nivel de ingresos y los beneficios.

La subdivisión e interpretación para el caso de un parque eólico sería (Krokoszinski, H-J., 2003)**:**

- *Pérdidas Externas.*

La tabla 21 recoge la subdivisión e interpretación en términos específicos para un parque eólico de las pérdidas externas y la capacidad de influencia en la fase de planificación de O&M. La tabla muestra que las pérdidas externas sólo pueden ser planificadas parcialmente (e.j., mantenimiento programado); otras vienen impuestas por factores externos (condiciones climatológicas, huelgas, etc.) donde el nivel de influencia es bajo o nulo. Sin embargo, todas deben ser trazadas en el PF. Es conveniente tener valorado y previsto planes de contingencia para aquellos factores poco frecuentes y poco o nada controlables. Respuestas estratégicas posibles serían: asegurar el riesgo, acuerdo contractual, clasificar como fuerza mayor, entre otras.

La tabla 21 resulta de gran utilidad como matriz de decisión semicuantitativa para orientar la estrategia de O&M y los aspectos claves en la negociación del contrato.

Tabla 21: Subdivisión de las pérdidas externas en base a la teoría general (Krokoszinski, 2003). Matriz de Evaluación.

Tipos de pérdidas	Causas de Pérdidas Externas (Teoría General)	Causas de Pérdidas Externas (Parques eólicos)	**¿Influenciable por O&M?**	Estrategia de O&M (PF)
(a) Pérdidas Exter – nas (downtime)	Downtime Planificado (para mtto.preventivo)	Autocontrol stops: i.e. parada controlada re-motamente,system test y auto- restart	**Sí**	Proceso de planificación
	(mantenimiento programado)	Mantenimiento Regular		Proceso de planificación
		Overhauls principales: actualizaciones y modi-fijaciones de hard/ soft-ware		Proceso de planificación
(b) Pérdidas Exter – nas (speed losses)	(i) Caída de la deman da.	Limitación exportación a red	No	Definir Estrategia (acuerdo contractual)
	(ii) Caída o pérdida de suministro materia pri ma.	Menor viento del esperado en función a los datos estadísticos (DVN)	No	Definir Estrategia
		Disminución de la E.P. por desviación de la rosa de los vientos	No	Definir Estrategia
	(iii) Exceso de oferta (viento)	Protección sobrecarga aerogenerador (multipli cadora, bancada, gene rador, transformador, etc.)	**Sí**	Proceso de planificación
		Protección sobrecarga instalación eléctrica	**Sí**	Proceso de planificación
	(iv) Pérdida de perso nal	Enfermedad, huelga, epidemia, …	No	Estrategia (e.j. Fuerza mayor)
	(v) Regulación medio ambiental	Reducción de la pro-ducción para preservar el medioambiente, redu cción de ruido de forma continua o a determina-das horas, o dependien do de la dirección del viento, por efecto som - bra, por avifauna, fli - ckers, etc.	No	Estrategia (e.j. Fuerza mayor)
(c) Pérdidas Exter – nas (External quality losses)	Pérdida de calidad (e.j. durante start-up)	Degradación de la potencia activa debido a una mala calidad de la energía	No	Estrategia

- *Pérdidas Técnicas.*

1. *Downtime no planificado (Disponibilidad, A).*

La causa principal es el fallo (de misión o de demanda). El downtime total no planificado de un elemento del sistema (WEC, subestación, otros) depende de factores que fundamentalmente están relacionados con la ingeniería y el proceso de planificación de O&M:

- errores o falta de validación en los cálculos de las instalaciones críticas (instalación eléctrica, cimentación, etc.),
- falta de supervisión en la ejecución de obras críticas,
- política de mantenimiento,
- tipo de fallo, accesibilidad,
- experiencia y cualificación del equipo humano, tiempo de respuesta, asisten - cia técnica del tecnólogo.

- política de stocks de repuestos, etc.

2. *Pérdidas Técnicas de velocidad (Desempeño -Performance, P).*

Pueden estar causadas por:

- *Maximum Power Point (MPP-tracking)*: no existe control de velocidad variable; pitch control está fuera del punto óptimo; etc.
- Desviación de la curva de potencia (suciedad por hielo en palas; daños leves en palas; derating de potencia por alta temperatura ambiente, o por alta temperatura en multiplicadora, generador o transformador; otras).
- Paradas cortas para reparaciones rápidas de pequeños fallos.

Las causas anteriores producen una reducción de la energía eléctrica disponible, de la productividad y rentabilidad económica del parque. Una vía de reducir los efectos es una apropiada política de O&M (apropiado condition monitoring on-line; modelización apropiada de la curva de potencia; intervalos de inspección; tiempos de respuesta; etc.)

*c) Dimensión recursos***.** *Disponibilidad y gastos en mantenimiento.*

El downtime es un componente significativo de coste en las industrias de generación eléctrica. Por tanto, un programa para la mejora de la rentabilidad económica de un parque eólico se centraría en la definición de las especificaciones técnicas y la política de O&M. Un objetivo del programa sería mantener un nivel óptimo de fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo.

El fallo es definido como una interrupción de la capacidad funcional o disminución del rendimiento por debajo del umbral establecido en las especifica - ciones funcionales. Las consecuencias del fallo pueden ser tanto financieras como no financieras: pérdida de tiempo de producción, satisfacción del cliente, incumpli - miento de garantías, penalizaciones legales, pérdida de reputación, u otro tipo de responsabilidades.

La fiabilidad representa la capacidad para responder y continuar operando sin fallo, y bajo determinadas condiciones específicas, durante un periodo de tiempo dado o edad. La fiabilidad natural es la fiabilidad propia/inherente del equipo (sin recibir mantenimiento) la cual dependerá directamente de las características físicas o de diseño; mientras que la fiabilidad intrínseca es la agregada (en principio mayor que la natural) en base a la cantidad de mantenimiento de calidad realizado (usual - mente preventivo). **(**Martorel,S., et al., 2004**)**

El mantenimiento representa, según Martorel, et al., el conjunto de actividades realizadas sobre el equipo con objeto de evaluar, conservar o restaurar su capacidad operativa. Aunque un equipo esté sometido a mantenimiento (correctivo y preven - tivo) este puede degradarse con el tiempo en función de las condiciones de trabajo y la efectividad del mantenimiento planificado (mantenimiento imperfecto). Por tanto, es importante la programación de actividades de predictivo para el control de los mecanismos de degradación, más la realización de retrofits para adecuar el equipo a las mejoras del mercado, tanto a nivel de hardware como de software.

El mantenimiento introduce también un efecto negativo, llamado efecto downtime, el cual viene representado por el tiempo que el equipo está fuera de servicio por mantenimiento: mantenibilidad vs. disponibilidad. Este tiempo depende de las características de mantenibilidad del equipo, las cuales son función no sólo de sus características físicas, sino también, de múltiples factores relacionados con el diseño, y en ocasiones, de las condiciones de entorno (experiencia y cualificación del personal, accesos, condiciones climáticas, otros).

La disponibilidad de un equipo, en general, viene representada por su capacidad de estar en estado para funcionar bajo unas condiciones especificadas sin fallo durante un periodo dado. La disponibilidad, o más directamente la indisponibilidad, depende no solamente del efecto downtime, sino también de la probabilidad de fallo para realizar su función (efecto de no fiabilidad). Para reducir este efecto es necesario planificar y programar intervalos de inspección.

Alcanzar un determinado nivel de *"disponibilidad contractual"* exige unos costes, los cuales normalmente serán mayores al aumentar dicho nivel (assesment of cost contributions). Por tanto, es importante una acertada planificación de la O&M.

La figura 108 ilustra los conceptos básicos, las restricciones, la influencia de las áreas de Ingeniería y Planificación de la Operación (Nivel 1), y Operación y Mante - nimiento (Nivel 2), en la disponibilidad y la rentabilidad económica de un parque eólico:

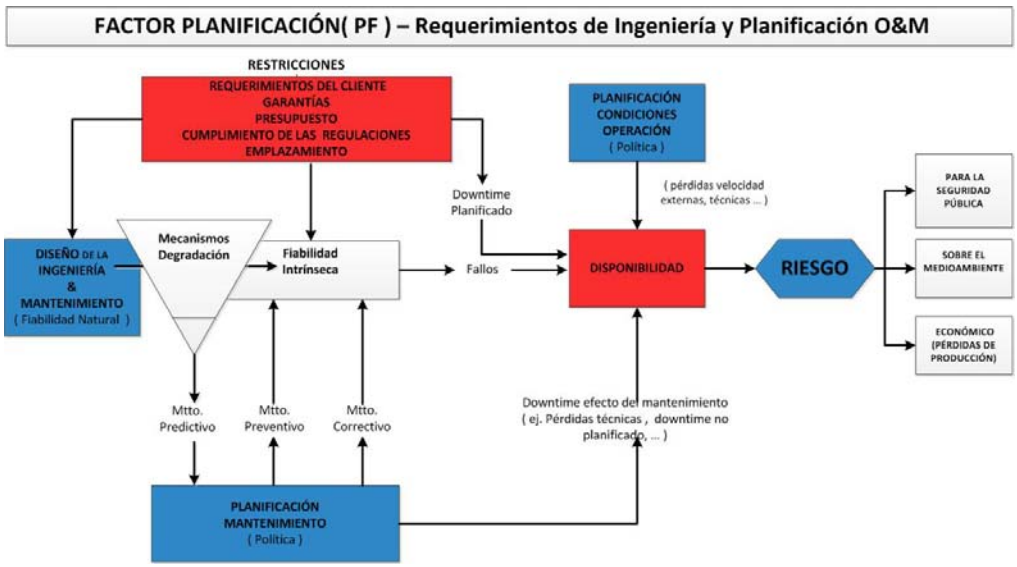


Figura 108: Disponibilidad y beneficio: el papel de las Especificaciones Técnicas y la planificación de la O&M (Adaptado de Martorel, S., et al., 2004).

Tal y como muestra la figura anterior, la rentabilidad económica de un parque está basada en el principio de disponibilidad. Consecuentemente, el riesgo económi - co aumenta con la pérdida de disponibilidad de sus instalaciones.

El retorno en mantenimiento puede ser considerado en base a la reducción del coste de la dimensión riesgo. Los costes de esta dimensión serán función del coste de los recursos. Esta variable de coste será la variable controlable en el proceso de optimización y será función de la calidad del mantenimiento. Por su parte, el gasto en mantenimiento puede cuantificarse en base al coste de los recursos para las acciones de mantenimiento más los costes vinculados a las pérdidas de operación:

$$ROI_M = \frac{\Delta(reducción\ del\ riesgo)}{Gasto\ en\ mantenimiento} \qquad \textbf{(21)}$$

$$-Gasto\ en\ mantenimiento = coste\ de\ recursos + pérdidas\ de\ operación$$

Los costes de la dimensión riesgo serán función del coste de los recursos. Esta última variable de coste será la variable controlable en el proceso de optimización; será función de la calidad del mantenimiento.

El criterio para priorizar las alternativas será el de asegurar el máximo retorno en el gasto en mantenimiento en forma de reducción de riesgo bajo las restricciones contempladas. Por tanto, es importante una buena comprensión de la relación coste del riesgo vs. gasto en recursos para cada alternativa. Ello exige un modelo que posibilite un análisis exhaustivo de alternativas a la vez que evaluar y comprender sus estructuras de costes.

El objetivo de la ingeniería será el asegurar que el ciclo de vida total del sistema sea considerado desde el principio. Este enfoque lleva aparejado la convivencia del ciclo de vida del sistema técnico con el ciclo de vida de su sistema soporte, por lo que se ha de integrar todos los factores necesarios (desempeño, productividad, fiabi - lidad, mantenibilidad, factor humano, soportabilidad, calidad, etc.) para brindar, en función de las necesidades identificadas, opciones de diseño viables.

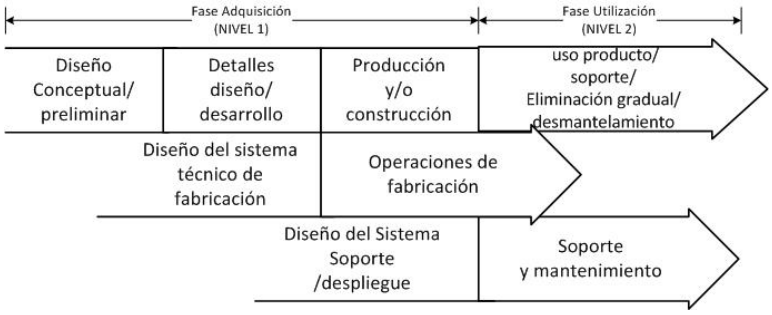


Figura 109: Ingeniería orientada al ciclo de vida (Ingeniería concurrente).
[Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991]

La fiabilidad y la mantenibilidad tienen una gran influencia sobre el coste del ciclo de vida (Hansen, R.C., 2001). Por tanto, sería interesante la planificación coor - dinada del mantenimiento, y su soporte logístico, en la fase conceptual (preliminar) del diseño.

El LCCA *(Life Cycle Cost Analysis)* suministra la viabilidad económica de un sistema cuando se introduce como parámetro en el proceso de diseño.

4.1.-2. Bases del modelo para la planificación y control de la O&M. Modelo de referencia para el diseño de alternativas STM+C.

De la figura 108 se infiere que el modelo para mejorar la información de apoyo a la toma de decisiones en la búsqueda de soluciones coste efectivas a la planificación de la O&M debe estar diseñado sobre la base de técnicas semicuantitativas que permitan integrar y balancear las restricciones, la disponibilidad contractual, los costes y los objetivos de rentabilidad.

Los problemas de mantenimiento tienen muchos aspectos que deben ser tenidos en consideración, lo que hace difícil formular modelos con carácter general.

Por otro lado, la competitividad está haciendo bascular el orden de importancia hacia el aseguramiento del estado, lo cual depende de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación.

La idea es intensificar el concepto de "mantenimiento planificado" y "manteni - miento efectivo" (Conde Collado, J., et al., 2003) con objeto de reducir los costes po - tenciales asociados al downtime. En el modelo propuesto, la verdadera planificación no comenzaría con el enfoque tradicional (reactivo) de planificación y programación de los trabajos de preventivo. El concepto se ampliaría (enfoque proactivo) para

iniciarla con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas ("Guías de Requerimiento de Servicios") y la planificación de los recursos necesarios, especial – mente humanos ("Guías de Planificación"). Estas guías serían excelentes documen - tos de referencia para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

De esta forma, la Función Mantenimiento debe dar respuesta en los tres niveles que garantizan la competitividad:

1. En el nivel inicial de inversión, con exigencias de diseño, construcción y montaje.

2. En los costes operativos, a través de la política/estrategia de mantenimiento seleccionada.

3. A nivel de facturación, según la capacidad que presente continuamente para garantizar el estado del equipo/sistema.

De acuerdo con el marco de trabajo descrito, y atendiendo a los ejes de actuación de la función mantenimiento para la mejora de la competitividad, el proceso de decisión para la optimización del diseño y la planificación y control dinámico de la O&M debería estar estructurado en dos niveles (figura 110):

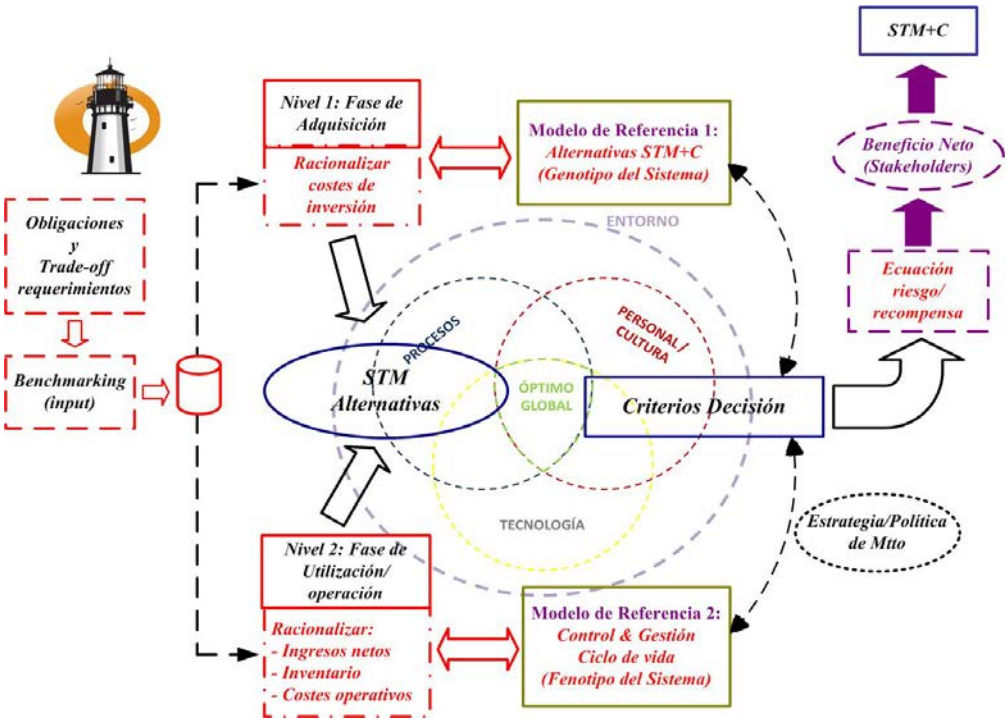


Figura 110: Sistema Conceptual para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida.

Un paso importante en la Gestión del Ciclo de Vida sería la identificación del interés y objetivos del cliente sobre un periodo de tiempo. Ello ayudaría a definir los criterios y la frontera temporal del diseño.

En general, hay básicamente dos tipos de requerimientos que influyen en los trade-off de decisión: requisitos obligatorios (regulaciones, legales, presupuesta – rios, etc.) y trade-off de requerimientos.

En el nivel 1 el objetivo es brindar <u>soluciones óptimas globales y gobernables en el ciclo de vida establecido para el sistema.</u> Se definirán las actuaciones a llevar a cabo durante la gestión de la inversión. Resulta interesante que en este nivel no sólo

se consideren los requerimientos funcionales sino que también se adapte y desarrolle el diseño para aumentar la disponibilidad, la fiabilidad y reducir los costes de mantenimiento en la fase de utilización/operación.

Uno de los objetivos básicos de este modelo es comparar los efectos de varios cursos de acciones: evaluación de los efectos de diferentes regímenes o políticas de mantenimiento, decidir una compra o inversión, otros. Típicamente la evaluación implicará comparar coste con valor añadido. La clave estará en evaluar la efectividad de una opción.

La figura 111 muestra el marco de referencia para el diseño de los modelos de decisión en los niveles 1 y 2, respectivamente:

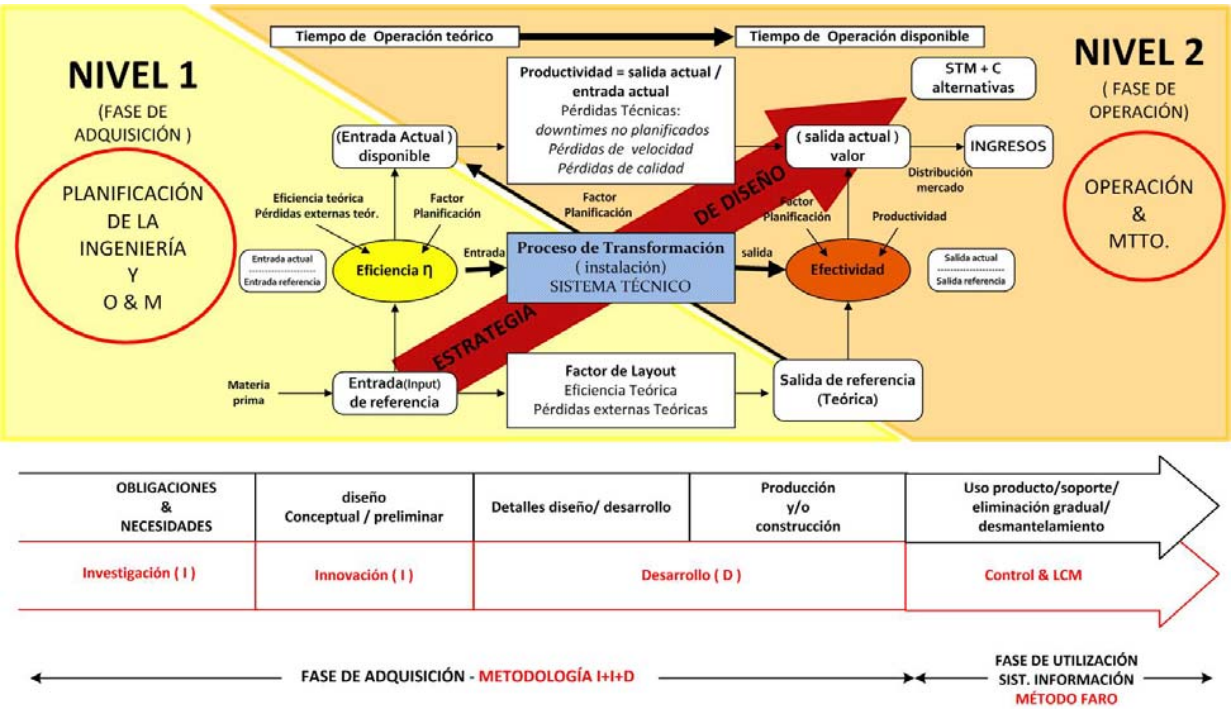


Figura 111: Marco de referencia para el diseño de los procesos de decisión en los niveles 1 y 2.

4.2. Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas (Project Break Structure: PBS).

El objetivo de esta fase es la definición del "genotipo técnico y económico" del sistema para estimar su capacidad (affordability analysis) y establecer la línea base ("baseline") para la comparación de alternativas.

En esta fase se dará respuesta, a través de un proceso de retroalimentación, a los Qué´s? que emergen de la fase anterior. Se define la configuración inicial a nivel de subsistemas y se consideran diferentes alternativas para los subsistemas con dife - rentes especificaciones técnicas, de operación y necesidades de mantenimiento (gama de subsistemas). Su objetivo es la definición refinada de subsistemas en términos funcionales.

Para obtener la alternativa más deseable y la gama de alternativas vinculadas con las que dar respuesta a los procesos de adaptación evolutivos inducidos por estímu - los internos y/o externos se propone la simulación de escenarios multivariables.

Es preparatoria para la definición a nivel de componentes.

El modelo considera los objetivos e intereses del cliente (trade –off requirements) para localizar la mejor solución más allá de lo estrictamente obligatorio. Para ello se

propone la selección y definición de índices (ponderados o no) para la ordenación y priorización de las alternativas.

En el diseño de la STM se consideran, no sólo aspectos funcionales, sino también factores económicos y otros aspectos vinculados al problema de diseño (emplaza - miento, restricciones a la subcontratación**,** restricciones legales y de mercado regulado**,** garantías, soporte logístico, DVN, otros).

Los conceptos de RAMS y LCCA pueden ser usados dentro del proceso de decisión en la fase de diseño para realizar un trade-off entre el desempeño (compo - nente de valor) y el coste total (componente de coste total) del sistema. RAMS y LCC son métodos utilizados para cuantificar el desempeño y diferentes categorías de costes, tales como coste inicial, coste de mantenimiento y coste de operación.

Para las diferentes etapas del diseño se distinguen 11 pasos (figura 57, capítulo III de la tesis):

P1: Análisis de requerimientos. Determinación de los criterios de evaluación y selección de las especificaciones funcionales ("functional performance").

El primer paso es el análisis, en función de las necesidades del cliente y las características del proyecto, de los requerimientos de desempeño del proyecto (KPIs). Los requerimientos identificados han de ser distribuidos a nivel de subsistema.

Es importante seguir las *Reglas generales para la selección y definición de los PI´s* expuestas en el capítulo III del presente trabajo de tesis.

Utilizar de forma mimética indicadores que se manejan en el sector sin una crítica de su utilidad hacia los objetivos establecidos puede resultar muy peligroso en la práctica.

P2: Análisis funcional y proceso de asignación. Diagramas de afinidad y Matrices de decisión.

En el segundo paso se seleccionan y definen los criterios para evaluar las alternativas y se determinan los trade-off de requerimientos. Los criterios para la evaluación se extraen de las *especificaciones funcionales (functional performance)* es - tablecidas por el cliente, a partir de las cuales, se desarrollan los trade-off de reque - rimientos que serán usados para evaluar y clasificar/puntuar las diferentes alternativas. Los trade-off de requerimientos expresan las condiciones que hacen estar al cliente más satisfecho. Los criterios de evaluación podrían ser: disponibilidad contractual, Eficiencia del Proyecto, C.P.G., G.M.A., costes (inicial, de manteni - miento, de riesgos específicos).

Otra componente importante también en el proceso de evaluación sería la del coste total. Esta componente (en valor presente) puede ser dividida en diferentes ca - tegorías, tales como: coste inicial, coste de mantenimiento y costes diferidos vincu - lados a los riesgos durante el ciclo de vida del sistema.

Las técnicas propuestas para esta etapa crítica de la fase de diseño son los diagramas de afinidad, Matrices de decisión y técnicas de ayuda multicriterio a la decisión (técnicas semicuantitativas). La construcción de las matrices la realizará el equipo nuclear seleccionado al efecto mediante la utilización de técnicas de trabajo en equipo. El objetivo es alcanzar el consenso entre las partes implicadas en la financiación, diseño, implantación y explotación (definir y delimitar fronteras).

P3: Gama de alternativas.

En este paso se identifican y evalúan diferentes configuraciones de diseño.

P4: Análisis del factor humano (opcional).

Su análisis será útil cuando se determine que la persona, o sus decisiones, son importantes en el funcionamiento del sistema. Una forma de valorar este aspecto sería mediante un análisis del "camino del fallo" (figura 112).

En el Anexo II del presente trabajo de tesis se propone una guía básica del equipo de gestión para el área de mantenimiento y se realiza una descripción de sus funciones y responsabilidades. Esta guía sería de utilidad para la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planificación"). Actuaría como documento de referencia para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo.

P5: Realización FTA. Análisis del sistema.

Se utilizará para mostrar los pasos específicos implicados en un fallo del sistema, discriminado su naturaleza (mecánico o humano). Esta técnica será de utilidad para el modelizado y análisis de los mecanismos de fallo del sistema. Será necesario articular un proceso para la obtención de datos acerca de las "causa raíz" del fallo. Podría recurrirse a diferentes fuentes: consulta a proyectistas expertos, constructores especializados, bases de datos existentes, otras.

Para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones se proponen los siguientes esquemas (figura 112) para el análisis:

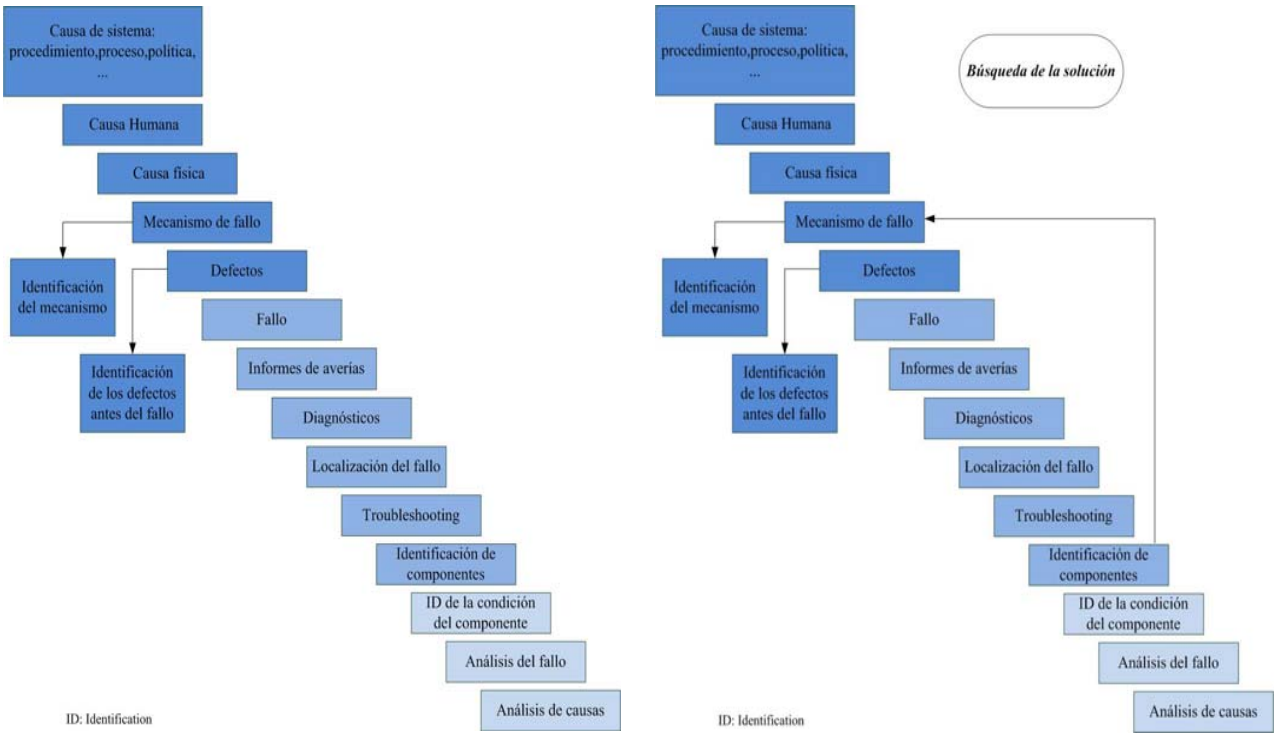


Figura 112: Esquemas para la comprensión y el seguimiento del camino del fallo y la búsqueda de soluciones al diseño (adaptado de Daley, D.T., 2008).

P6: Realización FMECA de los subsistemas. Documentación de los modos de fallo.

Se propone esta técnica para la identificación, estudio de los efectos y conse - cuencias (sobre producción, medioambiente, seguridad, sostenibilidad económica) de los principales modos de fallo que pueden ocurrir durante la vida de los subsiste – mas (FMEA) y la prevención de problemas, especialmente los que se califiquen como críticos. El análisis de criticidad es posterior al FMEA. La combinación de ambos estudios es el FMECA. El análisis de criticidad tendrá por objeto calificar cada modo de fallo de acuerdo a la influencia combinada de la severidad (consecuencia del fallo, si ocurre) y la ocurrencia (probabilidad o frecuencia del fallo). El riesgo de un modo de fallo y sus efectos se determinará por tres factores: la severidad, la ocurrencia y la probabilidad de detectarlo antes de que se produzca (detección); se evaluará a través del *RPN-teórico* y se expresará, en general, en tér - minos de coste. Este valor será utilizado para calificar el nivel de criticidad.

La tabla 22 muestra la matriz propuesta para el análisis:

Tabla 22: Matriz de análisis del riesgo de un item o función (adaptada de Schram, G., 2003b y c).

Item o función	Modo de fallo	Efectos	Severidad (S)	Causas/ mecanismos potenciales	Ocurrencia (O)	Controles/ Métodos predictivos	Detección (D)	RPN (Teórico)	Coste	Recomen- daciones /Responsable

Los resultados serán de gran utilidad para:

- El diseño del sistema, de los procesos, la estrategia y plan de mantenimiento.
- Identificar los modos de fallo más probables, establecer un lenguaje común, obtener información sobre MTBF y el downtime, pérdidas de producción debidas al fallo, etc.
- Determinar las características físicas del fallo potencial, y por tanto, el/los pa- rámetro/s de condición y las técnicas de medida para su monitorización.
- Determinar las tolerancias (boundary failure, desviaciones del setpoint admi – sibles), los intervalos de monitorización, etc., para la planificación del mantenimien - to (correctivo, preventivo, etc.).
- Tomar decisiones sobre recomendaciones sobre mantenimiento preventivo, soporte logístico (sparing), documentación, predicciones de LCC, entre otras.

Los objetivos básicos son:

(a) identificar las limitaciones y debilidades de (algunos) subsistemas y definir la/s estrategia/s para su elevación (STM “libres de fallos”) para el análisis coste - be - neficio. Con la probabilidad de ocurrencia y los efectos – consecuencias de un modo de fallo, el nivel de riesgo para ese modo de fallo, el riesgo total y el coste del riesgo para una alternativa (RDC_i) puede ser calculado. La ocurrencia de un modo de fallo se supone diferente para cada alternativa.

(b) Adquirir una buena comprensión de la relación coste del riesgo (RDC_i) vs. coste de los recursos, para cada alternativa.

P7: Análisis de seguridad.

Será realizado si las características del proyecto lo requiere. La base para su estudio y cálculo será el análisis de riesgos.

P8: Realización ETA .Desarrollo de escenarios posibles.

Este análisis es necesario para identificar los sucesos vinculados a fallos que estén recogidos en el contrato de mantenimiento. Ilustra las consecuencias del fallo de un componente o sistema. Los resultados serán utilizados para el proceso lógico de evaluación de probabilidades y plantear la Matriz de Evaluación para orientar la toma de decisiones acerca de:

- La estrategia y política de mantenimiento en base a los riesgos del modo de fallo.
- La estrategia y política de negociación de las condiciones del contrato de mantenimiento con el cliente.
- La formulación de las ecuaciones de compensación (penalizaciones y bonificaciones).
- La gestión del ciclo de vida del sistema (entre 20 y 25 años).

P9: Análisis del mantenimiento y de garantías.

Este paso es muy importante en el modelo. La función mantenimiento tiene una influencia importante en la gestión de riesgos, y por lo tanto, en la rentabilidad de la inversión. Los efectos de un análisis y diseño riguroso de esta función se traducen en una mejora de la disponibilidad, fiabilidad y operatividad de los equipos, una mayor seguridad, menor nivel de pérdidas de producción, menores efectos medioambientales, reducción de pérdida de calidad y costes de mantenimiento, entre otros.

La complejidad de la función mantenimiento obliga, con objeto de brindar la máxima contribución a los objetivos del negocio, que su organización se diseñe sobre un enfoque holístico donde se contemplen todas las partes críticas al mismo tiempo.

- ***Análisis de riesgo y de garantías de desempeño. Trade-off niveles especificaciones de funcionamiento vs. coste total.***

El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incertidumbre de una decisión. En un entorno complejo y de alta competitividad, la toma de decisiones informada en la fase de adquisición es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos. Los efectos de adoptar una solución deficiente ("patologías de diseño") normalmente emergen en la fase de utilización, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.

Para que un problema de análisis de riesgo resulte manejable es fundamental definir claramente los objetivos, los cuales pueden especificarse en términos de disponibilidad, fiabilidad, seguridad (operacional, etc.), financieros, otros.

En esta etapa se abordan básicamente dos problemas:

I. Identificar y comprender, de forma pormenorizada, los riesgos/peligros potenciales asociados a una solución/decisión (Evaluación/valoración).

II. Conocer cómo gestionar las consecuencias asociadas a cada escenario probable (Gestión).

Por tanto, en este análisis es importante distinguir dos fases bien diferenciadas:

(a) La fase de Valoración /evaluación. Chequea el logro de los objetivos.

(b) La fase de Gestión. Busca satisfacer los objetivos. En esta segunda fase se proponen las alternativas, se evalúan (para cada alternativa) las curvas de riesgo, se eligen las alternativas coste-efectivas para el control de riesgos y se definen los cursos de acciones correctivas. Es importante remarcar que las alternativas se definen en base a los siguientes criterios:

- Minimizar la probabilidad de ocurrencia.
- Reducir el impacto de las consecuencias.
- Transferir el riesgo (por ejemplo, vía póliza de seguro, contratos llave en mano, o contratos integrados a largo plazo (8- 15 años).

Esta segunda fase se corresponde con la toma de decisiones en base a los trade-off entre los costes de las alternativas, los riesgos y las curvas de riesgos. Se propone tomar una alternativa libre de riesgo (baseline) para realizar la evaluación de las alternativas.

El plan de mantenimiento, para cada alternativa, se diseñará sobre la base de los resultados del FMECA obtenidos en P6. Con la información de los efectos asociados al modo de fallo de una alternativa puede ser estimado el número de fallos y la cantidad de downtime esperada para un periodo de mantenimiento. Esta información permite el cálculo de la fiabilidad de la alternativa(i). La disponibilidad será calculada a partir del uptime y el downtime. El uptime puede ser calculado a partir del downtime y el tiempo total de operación.

(*) Normalmente, las horas base para el cálculo de la disponibilidad se calculan en función de las horas en las que la instalación ha tenido capacidad para producir energía; es decir, que ha estado conectada a la red, y ha estado dentro de parámetros (tensión y frecuencia). Si no hay capacidad de producción por avería en la SET o LAAT, o por restricciones del operador del sistema (REE)), no computa el tiempo como horas base.

En el Anexo III del presente trabajo de tesis se recogen los estándares aplicables a los procesos de evaluación de riesgos, y una guía básica para la planificación óptima de la función mantenimiento en la fase de diseño en base al análisis de riesgo.

- ***Análisis de las garantías de desempeño y ecuaciones de compensación.***

Se considera muy importante tener una definición consensuada y detallada de las garantías de desempeño y sus ecuaciones de compensación en la fase de concurso y adjudicación por su impacto sobre la componente de coste total de cada alternativa. En el modelo propuesto forman parte del proceso de decisión y de selección de la mejor alternativa.

Se definen en la Fase 3 (fase de diseño definitivo) en base a la información de los efectos de los modos de fallo y sus consecuencias para una alternativa y una rigurosa comprensión de la relación coste de riesgo vs. coste de recursos, para cada alternativa .

Para la selección rigurosa y fiable de una STM+C que garantice un nivel de rentabilidad y competitividad sostenible en el tiempo se considera fundamental traducir las garantías de desempeño en términos económicos.

Para el modelo, las “garantías de desempeño” son los umbrales mínimos (niveles de corte) de las especificaciones de funcionamiento que debe cumplir una STM para ser aceptada. Serán consensuadas por las “Partes”en el marco “ganar-ganar”. Para el caso del sistema técnico en estudio (parque eólico onshore) podrían venir definidas por los siguientes tres factores: GMA para cada periodo de producción, CPG y “Eficiencia del Parque/Proyecto (EP)”.

Su conversión/traslación a términos económicos será realizada a través de las denominadas “fórmulas de compensación”, en cuya expresión deberán aparecer como términos; pueden ser positivas (bonus) y negativas (penaltis); serán utilizadas para cuantificar económicamente los costes/beneficios diferidos de una STM.

Se considera que el análisis de las garantías de desempeño (y la formulación de sus ecuaciones de compensación) es muy importante en las fases de concurso y adjudicación para crear un incentivo económico en el contratista que le motive a mejorar los niveles de RAMS de la solución seleccionada y a reducir los efectos

diferidos (económicos, accidentes, otros) asociados a errores en el diseño o a la toma de decisiones en la Fase de Adquisición. Se propone ser usadas para minimizar las consecuencias sobre el cliente/usuario de una solución y transferir los costes /benefi - cios de la misma al contratista o subcontratista.

Ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo de toma de decisiones basado en el riesgo expuesto en este trabajo de tesis.
Su consideración en el proceso de decisión en la fase de concurso y adjudicación sería interesante para los siguientes fines:
a. Como incentivo financiero para el contratista y subcontratista para la mejora de los niveles de los requisitos funcionales establecidos (fiabilidad, disponibilidad, CPG, GMA, E.P., entre otros).
b. Reducción de los efectos diferidos (económicos, accidentes, otros) asociados a errores en el diseño o la toma de decisiones en la fase de adquisición.
c. Reducción de los efectos diferidos sobre el cliente.
d. Iniciar un cambio cultural en aras a introducir un modelo que enfatice los procesos de decisión basados en el riesgo, las consecuencias y los factores asociados a la sostenibilidad (ambiental, social, económica, etc.).
e. Buscar la mejor solución desde un enfoque centrado en el ciclo de vida global del sistema (ingeniería concurrente).

Se considera una buena forma de cuantificar económicamente la efectividad total de un sistema y de imputar los costes diferidos a la parte responsable de los mismos.

P10: Cálculo del LCC. Fases del análisis y mapa conceptual.

Un aspecto que refuerza el uso de la metodología LCC en el *Nivel 1* es que a medio plazo, la demanda de producción sobre los activos aumenta, y con ello, el nivel de stress sobre los equipos de producción, lo que conduce a una caída de la disponibilidad realizada. Al mismo tiempo, la gestión del mantenimiento trata de aumentar la disponibilidad operacional con objeto de cumplir con las demandas de producción. La solución está en actuar sobre la *disponibilidad inherente (*etapa inicial del diseño).

La búsqueda del equilibrio coste vs. beneficio en base al interés y objetivos del cliente justifica la aplicación y uso del LCCA, en base al análisis de riesgo, en el proceso de selección de alternativas.

Los procedimientos y el conjunto de técnicas para realizar el análisis dependerá del alcance del estudio.

En el Anexo IV de este trabajo de tesis se da una visión del LCCA.

Resultados del análisis: Matrices de decisión.

Los resultados deben apoyar la toma de decisiones informada, tanto a priori como a posteriori, para:

- Evaluar y comparar alternativas de diseño: *Gama de alternativas.*
- Evaluar la viabilidad económica del proyecto.
- Identificar los “conductores de costes e ingresos”.
- Orientar las ”acciones de mejora coste efectivo”. En base al consenso de los agentes responsables de su cumplimiento, obtención de los ratios y los clusters de ratios ad-hoc para la gestión.
- Alinear objetivos a nivel estratégico, operativo y táctico.
- Evaluar y comparar estrategias alternativas de productos, operación, test, inspecciones, mantenimiento, mercados, otras.

- Evaluar y comparar diferentes enfoques para la renovación/rehabilitación/ extensión de vida o eliminación de instalaciones.
- Los análisis de sensibilidad e incertidumbre del proceso de evaluación per - mitirán: estimar la E.P. para la STM+C seleccionada; el establecimiento de las tole - rancias, y por tanto, los niveles de desviación admisibles para la consecución de los resultados ("Coeficientes de elasticidad"); el establecimiento de los niveles de" alerta temprana" y los Planes de Actuación relacionados; determinar los grados de libertad admisibles para las variables de decisión seleccionadas; lanzar los escenarios para orientar los procesos de simulación.
- Planificación financiera a largo plazo.
- Implicar a operación y mantenimiento en la fase de adquisición.
- Generar una base de datos relevantes para la toma de decisiones futuras, etc.

P11: Proceso de decisión para el Diseño de Soluciones Técnicas y de O&M. Método de "óptimos anidados".

El programa para el aumento del nivel de los factores de RAMS y la rentabilidad económica de un sistema técnico debería estar centrado sobre la mejora de su Eficiencia y Efectividad. Debería ser un" programa vivo".

El marco de referencia considerado en el modelo para la optimización del diseño y la planificación de la O&M es el propuesto por Tam y Price (2008a), quienes consideran que existen tres dimensiones críticas en el proceso de toma de decisiones para optimizar la planificación del mantenimiento: dimensión salida (output), dimensión riesgo y dimensión recursos (figura 113):

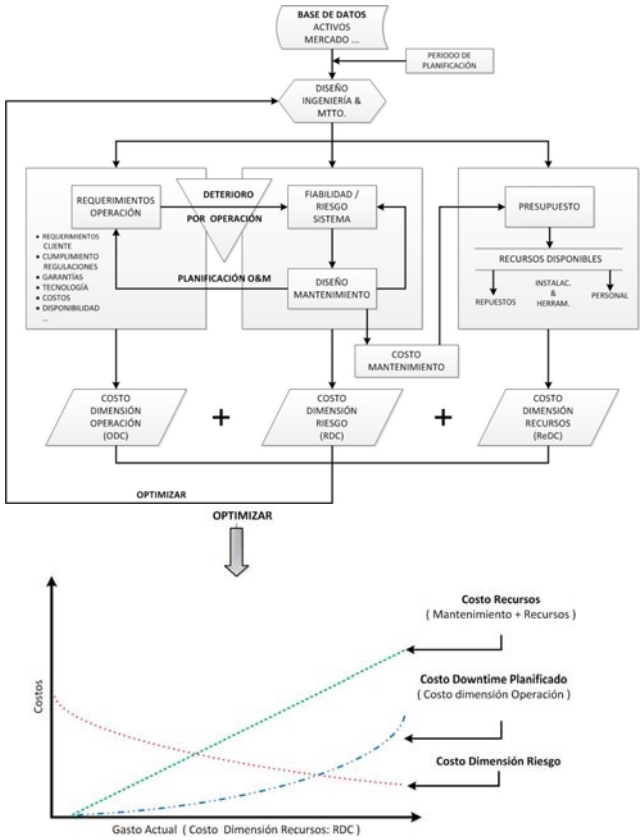


Figura 113: Marco de referencia para la optimización del diseño y la planificación de la O&M (Tam y Price, 2008a). Método de "Óptimos anidados".

Las etapas del proceso propuesto serían:

- ***Etapa 1:*** *Formulación de Garantías de desempeño y ecuaciones de compen – sación: Costes diferidos de producción. Análisis de sostenibilidad económica.*

Dado su impacto sobre la componente de coste total de cada alternativa y de su factor de sostenibilidad económica, se considera clave tener una definición consensuada y detallada de las garantías de desempeño, y sus ecuaciones de compensación, en la fase de concurso y adjudicación para orientar el proceso de diseño y de selección de la mejor solución, y su gama de alternativas, en el nivel 1.

La formulación aquí expuesta se corresponde con el análisis de un caso real.

• *(a) Garantía de Disponibilidad*. Para cada periodo de producción, dentro del periodo de garantía, el Contratista ha de garantizar el nivel de GMA de los aero - generadores en una cantidad, expresada en %, que suele variar desde la fecha de inicio o de emisión del certificado de aceptación provisional (normalmente > 90%) hasta un periodo de tiempo posterior establecido por el contratista (donde normal - mente se fija en una cantidad igual o superior al 95%). La Disponibilidad de cada aerogenerador se calcula en base a una "fórmula acordada/consensuada" entre las "Partes" y que se introduce en contrato (*Disponibilidad contractual"*):

$$\text{Ejemplo: Disponibilidad Contractual} = \frac{100\,\%(\text{HUA})}{\text{HUR}} \qquad \textbf{(22)}$$

- HUR (Horas Uptime Red): Nº de horas en que los parámetros de la red están en condiciones de funcionamiento.
- HUA (Horas Uptime del Aerogenerador): Nº de horas en las que el Aerogenerador está preparado para funcionar y generar energía dentro de las horas HUR. Se pueden consensuar causas para períodos durante los cuales el aerogenerador no genera energía sin afectar a las horas HUA.
(*) Una de las consideraciones a tener en cuenta en esta definición es la referencia de tiempo: tiempo de calendario o tiempo de operación programada.

- *"Compensación negativa" por Falta de Disponibilidad (acuerdo entre las "Partes"):*

Condición de "Compensación negativa": *GMA < RA.*

I. *Resultado de Disponibilidad (Kwh)=* ***EGA*** *- EMDA = (GMA * DVN * CPG* NAG *EP) – (RA * DVN * CPG* NAG* EP) = (GMA – RA) * (DVN * CPG* NAG *EP)* **(23)**

II. *Ec. de Compensación: (E G A – E M D A) * PFE= udes monetarias* **(24)**

- CPG: Curva de Potencia Garantizada. Acordada entre las "Partes".
- GMA: Disponibilidad Media Garantizada (cantidad constante, en %, garantizada en contrato por el Contratista para cada periodo de producción). Factor de referencia.
- RA: Disponibilidad Real Media de cada aerogenerador (calculada en base a la información proporcionada por el SCADA).
- **EGA (KWh)** : Energía Garantizada Anual (Calculada en función de las garantías ofrecidas por el Contratista en contrato).
- DVN: Distribución de Viento Nominal.
- NAG: Nº de aerogeneradores.
- EP: Eficiencia del Proyecto ($LF(Layout\ Factor) = \eta_{park}\ \eta_{el.}$).
- EMDA (Kwh): Energía Medida Disponible Anual (Calculada en base al valor de RA).
- PFE: Precio Final de la Electricidad (€/KWh) . Se calcula como el cociente entre el ingreso neto recibido por el Cliente (mes o año) dividido entre la energía activa producida en el periodo de tiempo considerado como referencia de cálculo.

• *(b) Garantía de Curva de Potencia.*

1b. *"Régimen transitorio": Puesta en marcha = primer periodo de producción.*

Tiene como finalidad compensar la inversión. El Contratista ha de garantizar para el proyecto que:

PEAMT ≥ xx,00 % *PEAN (Garantía fijada por el Contratista):*

- *Si PEAMT* ≥ xx,00 % *PEAN :*

1. - No aplica compensación de la inversión.

2. - PEAR = xx, 00% PEAN (para todos los restantes Periodos de Producción)

- *Si PEAMT < xx,00 % PEAN :*

1. Aplica compensación negativa de la inversión (acuerdo entre las "Partes").

2. PEAR = PEAMT (para todos los restantes Periodos de Producción).

(*) *Normalmente xx, 00% ≥ 95 %.*

- PEAMT: Producción Energética Anual Medida en el Régimen Transitorio (en kWh).
- PEAN: Producción Energética Anual Nominal (en kWh). Es la suma de los productos calculados multiplicando CPG y DVN para cada velocidad del viento indicada en tabla y multiplicando dicha suma total por el número de Aerogeneradores y Eficiencia del Proyecto.
- PEAR: Producción Energética Anual de Referencia. Se utilizará para el cálculo de compensaciones por pérdida energética (en kWh). Se establece en base a las condiciones expuestas anteriormente.

Ecuación compensación negativa de la Inversión (PEAMT < xx,00 % PEAN):

I. Producción Energética Anual Nominal:

$$PEAN = [CPG * DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(25)}$$

II. Producción Energética Anual Medida en el "Régimen Transitorio":

$$PEAMT = [CPM_T * DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(26)}$$

III. Referencia: Condición económica de compensación consensuada por las "Partes" (normalmente un % del Precio Contractual correspondiente por cada % que xx,00 % de PEAMT < PEAN).

"*Ecuación Compensación Negativa de la Inversión*" (fijada en contrato):

$$(PEAN - PEAMT) * (referencia) = udes\ monetarias \qquad \textbf{(27)}$$

(*) Esta Garantía se verifica mediante empresa cualificada externa e independiente, aceptada por las "Partes", a través de la medición de la curva de potencia en un Aerogenerador (Aerogenerador de Prueba) del Proyecto, siguiendo un procedimiento normalizado (norma IEC-61400-12 y procedimientos MEASNET).

(**) El resultado del procedimiento de medición será la curva de potencia medida (CPM_T) para el Proyecto y el perio - do de producción considerado.

2b. *Régimen permanente. "Compensación por Pérdida Energética".*

Su cálculo se establece en función del valor de PEAR, el cual depende de que aplique o no la compensación por inversión. La condición de aplicación la ha de establecer el Contratista.

Condición de Compensación por pérdida energética:

$PEAM_P$ ≥ *PEAR (Garantía fijada por el Contratista).*

Si no se cumple la condición aplica la compensación, la cual se puede plantear en los siguientes términos:

- *Sin compensación de la inversión:*
  I. Producción Energética Anual de Referencia:

$$PEAR = xx{,}00\ \%\ PEAN = xx{,}00\ \%\ [CPG^{*}\ DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(28)}$$

II. Producción Energética Anual Medida en los periodos de producción correspondiente al "régimen permanente":

$$PEAM_p = [CPM_p * DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(29)}$$

III. Fórmula de Compensación negativa (sin pérdida de inversión):

$$(xx,\ 00\%\ PEAN - PEAM_P\ ) * PFE = udes\ monetarias =$$
$$(xx{,}00\ \%\ CPG - CPM_p) * DVN * NAG * EP * PFE \qquad \textbf{(30)}$$

- $PEAM_P$: Producción Energética Anual Medida en los periodos de producción correspondientes al régimen permanente (2º periodo de producción y sucesivos).

- *Con compensación por pérdida de inversión:*
  I. Producción Energética Anual de Referencia:

$$PEAR = PEAMT = [CPM_T * DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(31)}$$

II. Producción Energética Anual Medida en los periodos de producción correspondiente al "régimen permanente":

$$PEAM_p = [CPM_p * DVN] * NAG * EP \qquad \textbf{(32)}$$

III. Fórmula de Compensación(con pérdida de inversión):

$$(PEAMT - PEAM_P) * PFE = udes\ monetarias =$$
$$(CPM_T - CPM_p) * DVN * NAG * EP * PFE \qquad \textbf{(33)}$$

(*) La verificación de la garantía es por el mismo procedimiento.
(**) El resultado del procedimiento de medición será la curva de potencia medida (CPM_P) para el Proyecto y el periodo de producción considerado. En cada medición de cada periodo de producción se define un valor de $PEAM_P$.

- ***Etapa 2:*** *Optimización de la eficiencia. Elección de alternativas STM(i) para los subsistemas. Proceso de priorización y ordenación: Análisis de escalabilidad.*

En términos generales (nivel macro), las alternativas se evaluarán en base a los cálculos de desempeño y coste total. El modelo integra en el proceso de toma de decisiones las dimensiones críticas para priorizar y ordenar las alternativas con objeto de obtener el máximo ROI. Para equilibrar la componente de valor y coste total se propone que la evaluación y priorización se establezca en base a tres índices básicos: índice de desempeño (PI), índice de ROI (IRoi) e índice de Presupuesto (BI). Estos índices se definirán en base a las características del proyecto y los requeri - mientos del cliente (trade-off requerimientos). El IRoi considera la relación gasto en recursos vs. coste de la dimensión riesgo. Se utiliza para medir el retorno de la inversión en términos de reducción del coste de la dimensión riesgo (*RDC)*:

$$IRoi = \frac{\Delta(RDC)}{\mathrm{ReDC} + \mathrm{ODC}} \qquad \textbf{(34)}$$

El gasto en mantenimiento considera el coste de los recursos para las acciones de mantenimiento (Re*DC*) más los costes de pérdida de operación (*ODC*), donde se contemplarían las compensaciones por downtime. Las "penalizaciones y bonifica - ciones diferidas" se contemplarían en el numerador.

Los índices serán usados como indicadores para la tarea de priorización y el análisis de escalabilidad. Todos los sistemas, subsistemas y componentes serán evaluados y ordenados de acuerdo a los índices (tablas 23, 24 y 25). La lista de subsistemas y componentes será usada para el diseño óptimo de la STM de acuerdo a las restricciones y las dinámicas consideradas (STM+C).

En base al marco de referencia adoptado, el proceso de priorización consta, básicamente, de las siguientes fases (figura 114):

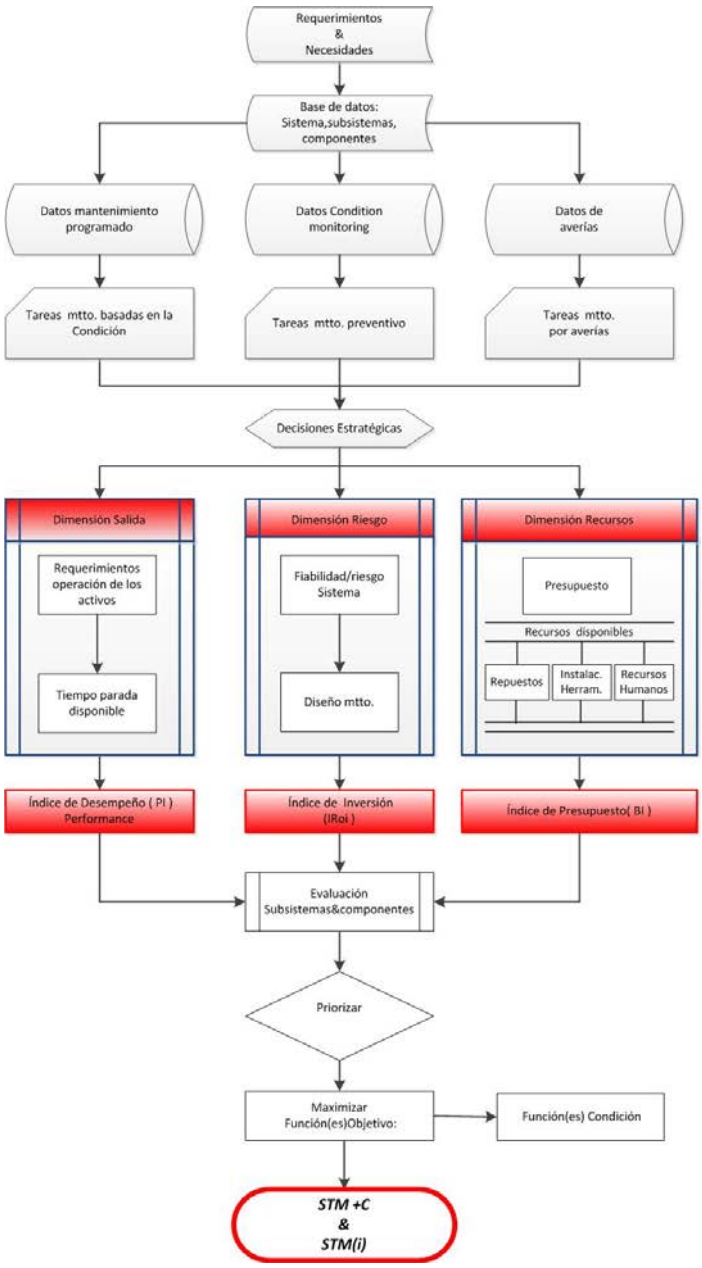


Figura 114: Marco conceptual para el análisis de escalabilidad. Evaluación y priorización de las STM(i) (adaptado de Tam, A.S.B. & Price, J.W.H., 2008b).

(a) En base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contem - pladas (presupuesto, riesgo tolerable, otras) se definen las entradas principales al proceso: objetivos estratégicos (a nivel financiero, de producción, etc.), nivel de riesgo tolerable y presupuesto.

(b) Recopilación de datos de los subsistemas y sus componentes. En base al análisis de estos datos se adoptan decisiones estratégicas (determinación del nivel de criti - cidad, entre otras).

(c) Cálculo de los índices seleccionados para cada alternativa.

Es importante tener en cuenta a la hora de seleccionar y definir los índices para evaluar y priorizar los sistemas, subsistemas y sus componentes, las reglas, de carác - ter general, propuestas en este paso en este trabajo de tesis.

(d) Evaluación y priorización de las alternativas en base a los índices seleccionados.

Son necesarios los tres índices para la priorización de las alternativas mediante un proceso de decisión que integre mantenimiento y producción con los aspectos financieros relacionados con el ROI.

(e) Determinación de la alternativa y ordenación de la gama bajo las restricciones consideradas (STM +C + gama). Análisis de escalabilidad.

En el supuesto de que no todos los componentes o subsistemas se puedan incorporar a la configuración debido a las restricciones establecidas, la selección para la definición y diseño de la solución inicial, y su gama de alternativas, se realizará en base al nivel de prioridad establecido en función de los índices.

El objetivo será asegurar el máximo ROI en el ciclo de vida del sistema bajo las restricciones contempladas. Por tanto, la solución pasa por definir alternativas STM que presenten el mayor IRoi con objeto de garantizar el mejor ROI. Luego, la priorización de los subsistemas y componentes puede ser planteada como un proble - ma de optimización.

Las condiciones de restricción no tienen por que ser absolutas ("restricciones dinámicas"); se pueden modificar/aumentar si se justifica con una importante redu - cción del riesgo y sus consecuencias. Para este propósito se consideran los índices *PI* y *BI*.

La técnica permitirá la toma de decisiones informada, en la fase de diseño, en la definición y el diseño de la STM+C (y la ordenación de la gama de alternativas) en base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contempladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, otras).

Para el proceso de ordenación de los subsistemas se obtienen sus tres índices por suma de los valores de los índices asociados a cada componente (tablas 23 y 24). Es importante tener la información desagregada por componente y subsistema para posibilitar los análisis de detalle que se estimen oportunos y poder definir los sistemas en base a diferentes escenarios (peso diferente para cada índice; comparación en sólo dos dimensiones: Roi y BI; etc.).Con objeto de mostrar el mejor retorno en la reducción del riesgo de un sistema se propone una ordenación desde el IRoi más alto al más bajo (más coste efectivos). Esto es, el de mayor IRoi se le asig - na un 1 en la *columna de Rank*; el que le sigue un 2, y así sucesivamente. Se propo - ne el criterio inverso para el BI (desde el más bajo al más alto) para reflejar los que suponen menor coste. Esto es, el de menor BI se le asigna un 1 en su *columna de rank*.

El valor medio (*AverageRank)* se calcula por suma simple, en el supuesto de que se considere el mismo peso para todos los índices; o de forma ponderada, en el caso contrario.

Se propone asignar un número de prioridad en función del *AverageRank* (otras opciones pueden ser planteadas en función de las características del proyecto). El número 1 (más alta prioridad) corresponde al del menor valor de *AverageRank*, en el

supuesto de que el criterio para el *PI* sea el mismo que el del *BI*. La más alta prioridad indica que el componente, susbsistema (o el sistema) es el de mayor IRoi y menor BI y PI.

En la tabla 25 se muestra una forma de ordenar y priorizar las alternativas para localizar la STM+C y definir y ordenar la gama vinculada en base a las restricciones establecidas (análisis de escalabilidad).

Tabla 23: Tabla tipo para el análisis y diseño de un subsistema.

Subsistema$_i$	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Comp$_i$1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Comp$_i$2											(*)	
Comp$_i$3											(*)	
...											(*)	
$\sum_k$												

Tabla 24: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un sistema.

Sistema$_i$	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Subsist1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Subsistem2											(*)	
Subsistem3											(*)	
...											(*)	

(*) $Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \frac{Rank\,IRoi + Rank\,PI + Rank\,BI}{3}$ (Otras opciones son posibles).

Tabla 25: Tabla tipo para el análisis de escalabilidad: ordenación y priorización de alternativas.

Sistemas	***Alternativas$_i$***	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***IRoi***	***BI***	***PI***	*Rank* ***IRoi***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***PI***	*Average Rank*	*Prioridad*
1	***S1***								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
2	***S2***											(*)	
3	***S3***											(*)	
4	***S4***											(*)	
12	***S1S2***												
13	***S1S3***												
14	***...***												
23	***...***												
24	***...***												
34	***...***												
123	***S1S2S3***												
124	***...***												
134	***...***												
234	***...***												
1234	***...***												

Notaciones:

K: tarea número k del paquete de tareas de mantenimiento (MP).

MDT_k (Maintenance Downtime para la tarea k): Tiempo requerido para la realización de la tarea k. Si se ejecutara dentro de un "mantenimiento oportunista" el tiempo asignado a esta tarea sería cero.

ODC (Output Dimension Cost): medida de las necesidades de producción y de los objetivos de prestación de servicios para operar un activo. La dimensión salida incluye las interrupciones planificadas requeridas para cumplir con los requerimientos de seguridad, calidad y normativos/legales. Se utiliza como base para definir el tiempo disponible para mantenimiento.

RDC (Risk Dimension Cost): Coste de los sucesos y eventos no planificados y no esperados. Se consideran las consecuencias, es decir, los costes diferidos (penalizaciones, multas,...) y las primas del seguro para cubrir eventos de baja probabilidad de ocurrencia. Se contemplarían, en general, los costes relacionados con la indisponibilidad y la corrección del daño por no mantenimiento. Base para estimar el ROI_M.

Re*DC (Resources Dimension Cost): Gastos de mantenimiento y soporte logístico.*

Para la resolución de problemas complejos se puede recurrir a la utilización de herramientas de programación dinámica.

Es muy importante una buena comprensión de la relación Re*DC* vs. *RDC* para obtener la relación coste vs. riesgo, para cada STM. Para conseguir este objetivo se propone utilizar conjuntamente:

- la tabla 25 para combinar diferentes sistemas que nos brinden diferentes alternativas, y
- el gráfico Re*DC*- RDC (figura 115) para seleccionar la mejor alternativa en base a los grados de libertad del sistema en cuanto a las restricciones.

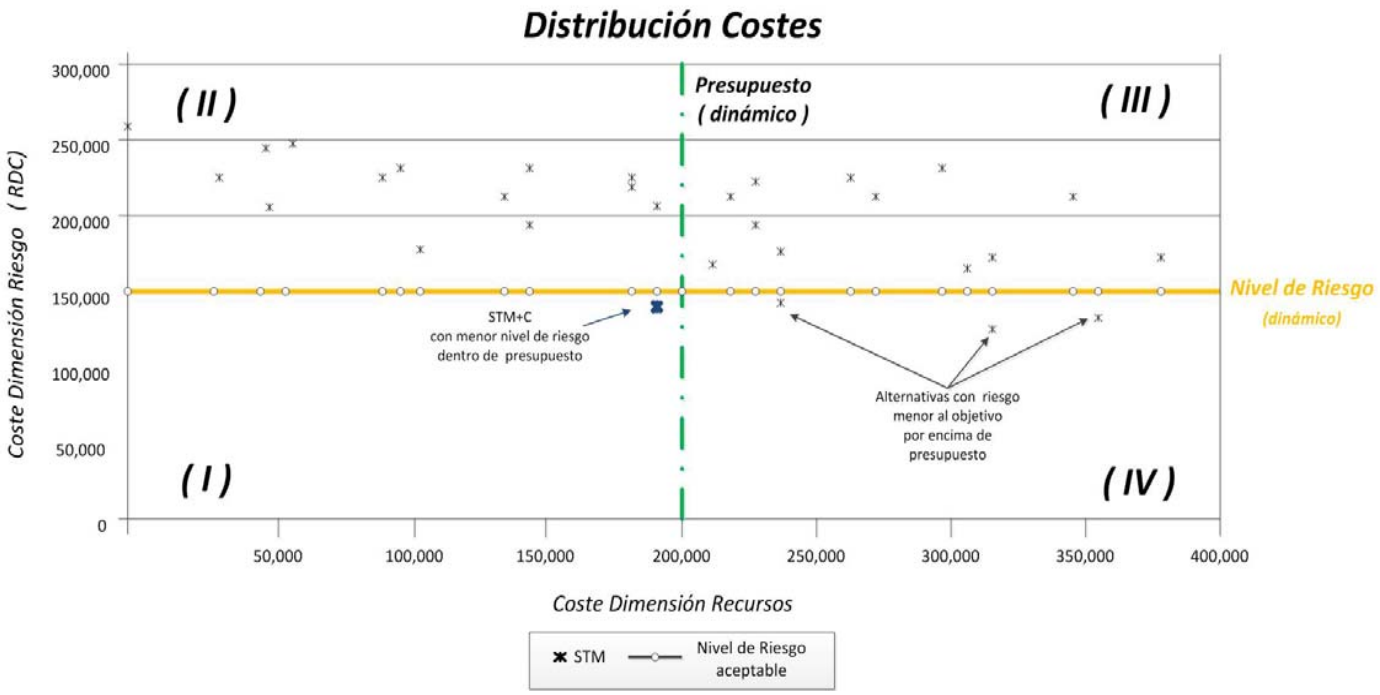


Figura 115: Gráfico Re*DC* - RDC para seleccionar la mejor STM en base a los grados de libertad del sistema.

- ***Etapa 3:*** *Optimización de la efectividad (productividad). Plan de mantenimiento: Proceso de priorización y ordenación. Base para el diseño de las Guías de requerimiento de servicios y las Guías de Planificación.*
- *Marco para la definición y diseño óptimo del plan de mantenimiento.*

La función mantenimiento tiene una influencia importante en la gestión de riesgos, y por tanto, en la rentabilidad económica del sistema técnico (Coetzee, J.L., 2000/1). De forma general, la función mantenimiento "hereda" un perfil de riesgo desde la fase de diseño (Etapa 2) que ha de gestionar en base a las siguientes restricciones básicas: restricciones formuladas por producción (a través de la estrategia de operación), limitaciones presupuestarias y de tiempo.

Los efectos de un bajo nivel de rendimiento en los objetivos de la Función mantenimiento se traducirán en una baja productividad (efectividad) que mermaría la rentabilidad del sistema técnico óptimamente diseñado (figura 116).

La figura 116 muestra que la gestión del mantenimiento tiene amplias posibilidades reales de contribuir a la rentabilidad del capital invertido mediante la selección y desarrollo de tareas eficaces que mejoren la disponibilidad y fiabilidad de los activos fijos (equipos e instalaciones necesarios para las actividades productivas) y el activo

circulante (ítems necesarios que dan soporte logístico a las actividades productivas, donde se encuadran los materiales y repuestos).

Sin embargo, a nivel técnico, es muy poco frecuente encontrar instrumentos que permitan conectar las actuaciones de mantenimiento con la repercusión económica que estas actuaciones tienen sobre la rentabilidad del sistema, y consecuentemente, sobre su cuenta de resultados.

Es en un entorno competitivo donde realmente se toma conciencia de que el Mantenimiento es importante en la producción, y que la aplicación de técnicas y métodos correctos de mantenimiento llevará a menores costes indirectos.

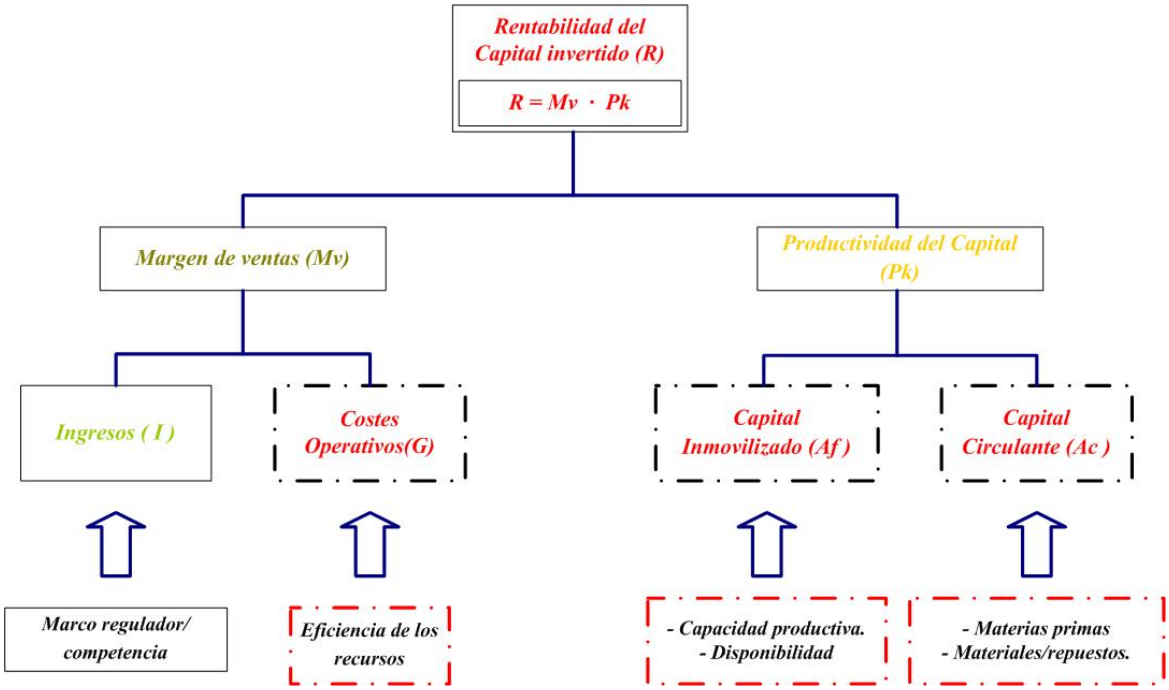


Figura 116: Árbol conceptual para evaluar la relación mantenimiento-productividad -rentabilidad.

El análisis del modelo desarrollado por la Eindhoven University of Technology (E.U.T.) revela como necesario, para la integración del mantenimiento dentro de la estructura del negocio, el diseño de un modelo mejorado que recoja los procesos in - ternos del bloque denominado*"Gestión del Mantenimiento"* (figura 117).

La figura indica que el salto cualitativo que debe perseguir la función mante - nimiento con objeto de dar respuesta a las exigencias continuas establecidas por las diferentes dinámicas del mercado es su evolución del actual enfoque basado en la intervención a uno nuevo centrado en la prevención.

Una de las líneas abiertas en la investigación relacionada con la gestión del mantenimiento es el desarrollo de técnicas de ayuda y apoyo a la toma de decisiones a los responsables de mantenimiento (planificador, ingeniero de mantenimiento y gerente) que le permitan realizar una gestión más científica (a nivel estratégico, táctico y operativo) para reducir los juicios subjetivos por análisis cuantitativos basados en la aplicación de métodos formales y científicos.

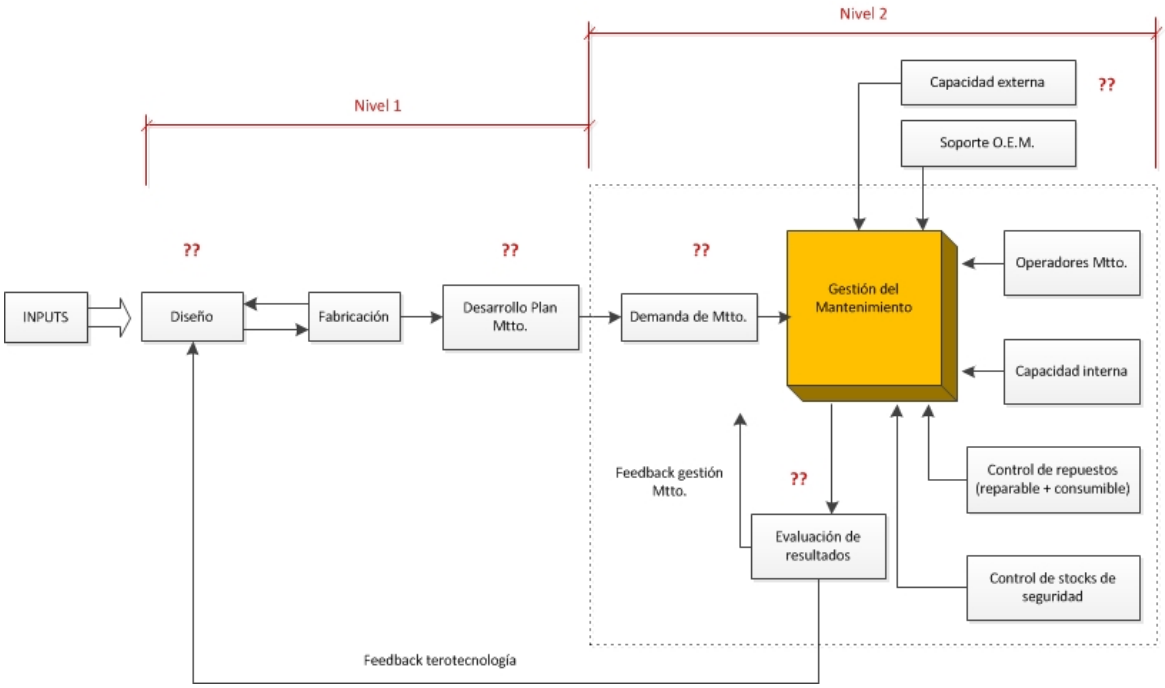


Figura 117: Hacia un nuevo modelo general del mantenimiento.

La idea es intensificar el concepto de "mantenimiento planificado" y "mantenimiento efectivo" (Conde Collado, J., et al., 2003) con objeto de reducir los costes potenciales asociados al downtime. En el modelo propuesto, la verdadera planificación comenzaría (enfoque proactivo) con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas ("Guías de Requerimiento de Servicios") y la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planificación").

- *Modelo para la maximización del ROI_M bajo restricciones económicas, de tiempo y/o riesgo tolerable.*

La atención debe centrarse en la definición de la estrategia de O&M que minimice el downtime y maximice la "disponibilidad técnica" por su influencia directa y positiva sobre los ingresos y el beneficio.

Una correcta aplicación de esta filosofía enfocada al ciclo de vida del sistema (ingeniería concurrente) optimizaría las políticas de mantenimiento en el *Nivel 2 (Mantenimiento en la fase de operación).*

Dado que el presupuesto destinado a mantenimiento y el tiempo de parada planificado para una unidad de producción suelen ser limitados, el modelo integra, en el proceso de toma de decisiones, las dimensiones críticas para priorizar y ordenar las actividades de mantenimiento con objeto de obtener el máximo ROI _M. Se toma como referencia el modelo propuesto por Tam & Price (2008b) para la priorización de los trabajos de mantenimiento que maximizan el ROI bajo restricciones de tiempo y presupuesto (figura 118). La técnica permitirá el diseño óptimo del plan de mantenimiento, en la fase de diseño, en base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contempladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, etc.). Permitirá la toma de decisiones informada en la definición y diseño óptimo del plan de mantenimiento.

La priorización se establecerá en base a tres índices: MII (Maintenance Invesment Index-inversión en mtto.), TI (Time Index-índice de tiempo) y BI (Budgetary Index-índice de presupuesto). Estos índices serán usados como indicadores para la tarea de priorización.

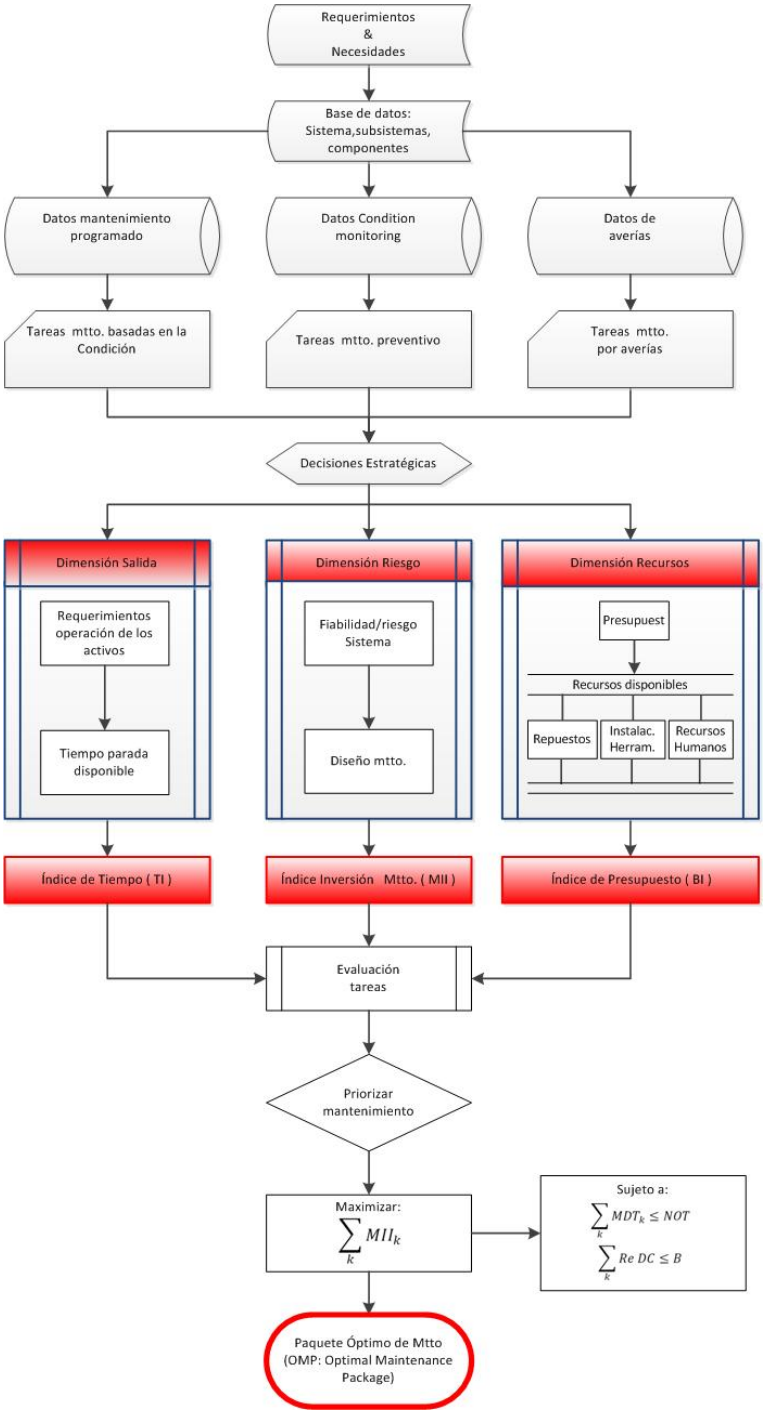


Figura 118: Marco conceptual para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento (adaptado de Tam & Price, 2008b).

El proceso de priorización consta de las siguientes fases:

(a) En base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contem - pladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, etc.) se definen las entradas principales

al proceso: objetivos estratégicos (a nivel financiero, de producción, otros), nivel de riesgo tolerable y presupuesto.
(b) Recopilación de datos del activo a analizar (de condición, averías, trabajos de preventivo, etc.) para estimar su rendimiento y proponer tareas de mantenimiento correctivo y preventivo. En base al análisis de estos datos se adoptan decisiones estratégicas (definición de áreas que necesitan mantenimiento, evaluación de los efectos y consecuencias, determinación del nivel de criticidad, otras).
(c) En base a las políticas estratégicas consideradas se determina el presupuesto y el tiempo disponible para el mantenimiento planificado para un periodo de planifica - ción *p*.
(d) Cálculo de los índices *MII*, *TI* y *BI*.
Son necesarios los tres índices para equilibrar las dimensiones financiera (MII), económica (BI) y temporal (TI). Para este proceso no es necesario un método "abso - solutamente matemático"; se puede utilizar un método semicuantitavo a la hora de asignar los *Rank* ***MII***, *Rank* ***BI*** y *Rank* ***TI*** en las" tablas tipo" (tablas 26 y 27).
(e) Evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento en base a los índices propuestos.
(f) Diseño óptimo del plan de mantenimiento bajo restricciones de tiempo y presu - puesto (STM coste efectivas). En el supuesto que no todas las tareas puedan ser realizadas debido a las restricciones de tiempo y presupuesto establecidas, la incor - poración de tareas para la definición y diseño del plan de mantenimiento se realiza - rá en base al nivel de prioridad establecido en función de los índices.

La reducción del riesgo también se puede ver afectada por factores tales como la disponibilidad de piezas de repuestos, las habilidades, experiencia y formación del personal y la calidad de los trabajos de mantenimiento.

El objetivo será asegurar el máximo MII bajo las restricciones contempladas. Por tanto, la solución pasa por definir Paquetes de Mantenimiento (MP) que presenten el mayor MII con objeto de garantizar el mejor ROI_M. Luego, la priorización de las tareas de mantenimiento puede ser planteada como un problema de optimización donde las funciones características serían:

$$\textit{Función objetivo}\ (a\ \max imizar): \sum_k MII_k \qquad (35)$$

$$\textit{Funciones de condición}(\textit{restricciones}):$$

$$1.-\ \Pr esup uestarias: \sum_k \operatorname{Re} DC_k \leq B \qquad (36)$$

$$2.-\ Tiempo(\ para\ \ ODC \rightarrow 0): \sum_k MDT_k \leq NOT \qquad (37)$$

Las condiciones de restricción no tienen por qué ser absolutas; se pueden aumen - tar si se justifica con una importante reducción del riesgo y sus consecuencias. Para este propósito se consideran los índices *TI* y *BI*.

- ***Notación.***

La notación que se utilizará en la descripción del proceso de evaluación y priorización es la siguiente:

B (Budget): Presupuesto.
BI (Budget index): Índice del presupuesto.
K: Tarea número k del paquete de tareas de mantenimiento (MP).
MDT_k (Maintenance Downtime para la tarea k): Tiempo requerido para la realiza - ción de la tarea k. Si se ejecutara dentro de un "mantenimiento oportunista" el tiempo asignado a esta tarea sería cero.
MII (Maintenance Invesment Index): Índice de inversión en mantenimiento.
MP (Maintenance Package): Paquete de tareas de mantenimiento.
NOT (Non-operating Time): Tiempo de parada disponible (de no operación) para el periodo p.
ODC (Output Dimension Cost): medida de las necesidades de producción y de los objetivos de prestación de servicios para operar un activo. La dimensión salida incluye las interrupciones planificadas requeridas para cumplir con los requeri - mientos de seguridad, calidad y normativos/legales. Se utiliza como base para defi - nir el tiempo disponible para mantenimiento.
OR_p (Operation rate en el periodo de planificación p): Factor de utilización en el periodo p.
P: periodo p de planificación de la planta.
RDC (Risk Dimension Cost): Coste de los sucesos y eventos no planificados y no esperados. Se consideran las consecuencias, es decir, los costes diferidos (penaliza - ciones, multas, etc.) y las primas del seguro para cubrir eventos de baja probabili - dad de ocurrencia. Se contemplarían, en general, los costes relacionados con la indisponibilidad y la corrección del daño por no mantenimiento. Base para estimar el ROI_M.
Re*DC (Resources Dimension Cost): Gastos de mantenimiento y soporte logístico*
T_p: Tiempo de producción para el periodo p: NOT = (1- OR_p) T_p.
TI: Índice de tiempo.

- ***Indices.***

Todas las tareas de mantenimiento serán evaluadas y ordenadas de acuerdo a tres índices (tabla 26): MII, TI y BI. La lista de tareas será usada para el diseño óptimo del plan de mantenimiento de acuerdo a las restricciones de tiempo y presupuesto. Para el cálculo de los índices se procede:

(a) *Índice de Inversión en Mantenimiento: MII (Maintenance Invesment Index).*

Se utiliza para medir el retorno del mantenimiento en términos de reducción del *RDC* en base al gasto requerido (en recursos y soporte logístico). Se define como:

$$ROI_M \simeq MII = \frac{RDC}{Gasto\ en\ mantenimiento(Coste\ de\ disponibilidad)} \qquad \textbf{(38)}$$

El *ROI_M* se interpreta como una reducción del *RDC* en un periodo de tiempo dado (normalmente el ciclo de vida establecido). Se estima en función a la reducción de los costes de indisponibilidad y daño por actuaciones de mantenimiento (costes indirectos de mantenimiento o de no mantenimiento). Por su parte, el gasto en mantenimiento considera el coste de los recursos para las acciones de mantenimiento más los costes de pérdida de operación (*ODC*), donde se contemplarían las

compensaciones por downtime. Las penalizaciones y bonificaciones se contem - plarían en el numerador:

$$MII = \frac{\Delta(RDC)}{\mathrm{ReDC} + \mathrm{ODC}} \qquad \textbf{(39)}$$

El coste del riesgo será función del coste de los recursos. La principal variable controlable en el proceso de optimización será el coste de los recursos destinados a la formación y preparación del personal y la calidad del mantenimiento.

Este índice se utilizará para asegurar que el objetivo de priorización de las tareas de mantenimiento es obtener el máximo retorno en términos de reducción del riesgo. Además, las pérdidas en producción, al ser medidas en relación al *ODC,* son preferibles que sean nulas, a no ser que se justifiquen por una elevada reducción del riesgo.

(b) *Índice de Tiempo: TI (Time Index).*

Se utiliza para medir el tiempo necesario para completar una tarea de mantenimiento con respecto al tiempo de interrupción disponible (NOT). Es un indicador para comparar el tiempo requerido por una acción con respecto a otra para un programa de mantenimiento alternativo. Se define como:

$$TI = \frac{\sum_k MDT_k}{\mathrm{NOT}}, \quad TI \leq 1 \qquad \textbf{(40)}$$

(c) *Índice de Presupuesto: BI (Budget index).*

La dimensión recursos está condicionada, para un periodo *p,* por el presupuesto asignado para mantenimiento y reemplazo, lo cual limita el nivel de recursos que pueden ser consumidos. Indica la parte de fondos que absorbe una tarea en relación al total dispuesto en presupuesto. Se define como:

$$BI = \frac{\mathrm{Re}\,DC_k}{\mathrm{B}}, \quad BI \leq 1 \qquad \textbf{(41)}$$

- *Método de ordenación.*

Para cada MP se obtienen sus tres índices por suma de los valores de los índices asociados a cada tarea (tablas 26 y 27). Otras formulaciones serían posibles. Es importante tener la información desagregada por tarea para poder hacer los análisis oportunos para diferentes combinaciones y supuestos. Por ejemplo: si se considera que el peso asignado a cada índice, en función de las características del proyecto, no es el mismo; se quiere realizar una comparación en sólo dos dimensiones (MII y BI, si el downtime no es un factor dominante; MII y TI, si los costes diferidos del downtime son importantes). Con objeto de mostrar el mejor retorno en la reducción del riesgo de un plan, se propone ordenar los planes desde el MII más alto al más bajo (más coste efectivos). Esto es, el de mayor MII se le asigna un 1 en la su *colum - na de Rank*; el que le sigue un 2, y así sucesivamente. Se propone el criterio inverso para los índices BI y TI (desde el más bajo al más alto) para reflejar los que consumen menor tiempo y suponen menor coste. Esto es, el de menor BI se le asigna un 1 en su *columna de rank*; el mismo criterio para el TI.

El valor medio *(AverageRank)* se calcula por suma simple, en el supuesto de que se considere el mismo peso para todos los índices; o de forma ponderada, en el caso contrario.

Un número de prioridad es asignado en función del *AverageRank.* El número 1 (más alta prioridad) corresponde al del menor valor de *AverageRank*. La más alta prioridad indica que la tarea (o el MP) es la de mayor MII y menor BI y TI.

Tabla 26: Tabla tipo para el análisis y diseño de un paquete de mantenimiento.

MP$_i$	***RDC***	**Re*DC***	***ODC***	***MDT***	***MII***	***BI***	***TI***	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Task$_i$1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Task$_i$2											(*)	
Task$_i$3											(*)	
…											(*)	
$\sum_k$												

Tabla 27: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento.

MP$_i$	***RDC***	**Re*DC***	***ODC***	***MDT***	***MII***	***BI***	***TI***	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
MP1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
MP2											(*)	
MP3											(*)	
...											(*)	

(*) $Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \dfrac{Rank\,MII + Rank\,TI + Rank\,BI}{3}$. Otra formulación es posible.

Para la resolución de problemas complejos se puede recurrir a la utilización de herramientas de programación dinámica, entre otras.

Habrá que valorar el proceso de selección del plan óptimo de mantenimiento cuando se calcula el RDC introduciendo las garantías de desempeño (factor de sostenibilidad económica); esto va a afectar al valor del MII, parámetro crítico en el proceso de priorización.

- ***Caso particular:*** *Limitación del nivel máximo de riesgo.*

Aplicaría cuando se establece entre las "Partes" garantizar un nivel tolerable de riesgo. Para asegurar que dichos niveles no son superados se propone acordar la posibilidad de invertir más en mantenimiento y otras medidas que contribuyan a la reducción del *RDC.*

El objetivo es asegurar que el nivel de riesgo tolerable no se excede con los mínimos recursos (Re*DC*) y mínimos costes de interrupciones:

$$\text{RDC = nivel tolerable} \left\{ \begin{array}{l} ODC \rightarrow 0 : \sum_k MDT_k \leq NOT \\ \min \text{Re}DC \end{array} \right\} \quad \textbf{(42)}$$

En este caso, el marco de referencia propuesto para la toma de decisiones en el proceso de priorización para definir el plan óptimo de mantenimiento sería el siguiente (figura 119):

Figura 119: Marco conceptual para la evaluación y priorización bajo restricciones económicas, temporales y de riesgo de las tareas de mantenimiento (adaptado de Tam & Price, 2008b).

En la base de datos de mantenimiento se recoge y registra diferentes tipos de datos, en base a los cuales, se generan diferentes tareas de mantenimiento a las que se les asigna sus índices de priorización. Las tareas son incorporadas al programa de mantenimiento hasta que el objetivo de riesgo tolerable es alcanzado.

Si el programa diseñado excede las restricciones de tiempo y/o presupuesto se activaría un proceso de análisis, a nivel de Alta dirección, o de equipo nuclear de diseño, para decidir si es posible modificar los límites o ajustar los requerimientos de la salida. En el caso de que los límites económicos y de tiempo no sean modificables, se evalúa la posibilidad de aumentar el límite de riesgo tolerable. Es muy importante una buena comprensión de la relación Re*DC* vs. *RDC* para obtener la relación coste vs. riesgo, para cada plan. Se propone utilizar conjuntamente:

- la tabla 28 para combinar diferentes tareas que brinden diferentes paquetes alternativos de mantenimiento, y
- el gráfico Re*DC*- RDC (figura 120) para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema en cuanto a las restricciones.

Tabla 28: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento.

Package	**MP_i**	**RDC**	**ReDC**	**ODC**	**MDT**	**MII**	**BI**	**TI**	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
1	**MP1**								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
2	**MP2**											(*)	
3	**MP3**											(*)	
4	**MP4**											(*)	
12	**MP1 MP2**												
13	**MP1 MP3**												
14													
23													
24													
34													
123													
124													
134													
234													
1234													

(*) $Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \frac{Rank\,MII + Rank\,TI + Rank\,BI}{3}$ .Otras formulaciones serían posibles.

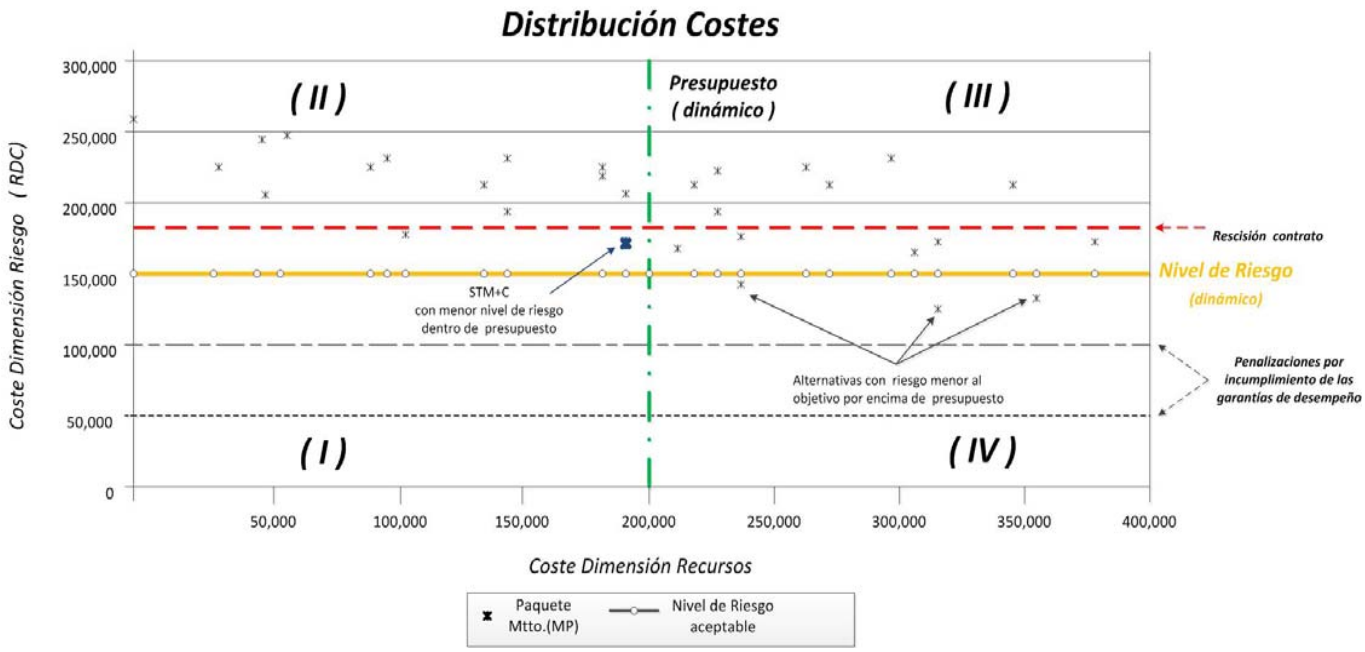


Figura 120: Gráfico Re*DC*- RDC para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema.

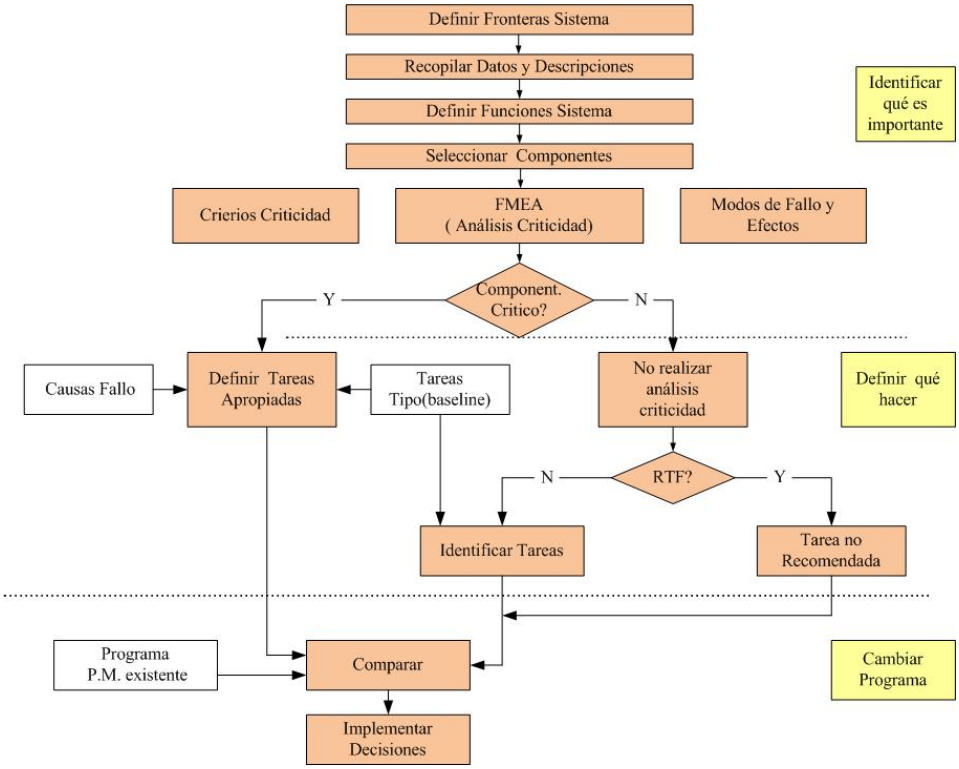
En el gráfico se pueden caracterizar cuatro regiones:

- *Región (I):* Planes de mantenimiento que cumplen las restricciones de presu - puesto y riesgo.
- *Región (II):* Planes de mantenimiento que cumplen las restricciones de presu- puesto.

- *Región (III):* Planes de mantenimiento no válidos.
- *Región (IV):* Planes de mantenimiento que cumplen la restricción de riesgo con mayor presupuesto.

4.3. Fase de diseño Definitivo: Desarrollo y detalles de diseño.

En esta fase se ultiman los detalles de diseño de la STM+C. El análisis se realiza a nivel de componente (figura 121).



(*) RTF: Revision Task Force

Figura 121: Esquema conceptual para el análisis a nivel de componente. (Barrat, M., 2004)

4.4. Fase de ejecución. Puesta en marcha.

Es la fase de verificación. En ella se evalúa y "calibra" la configuración de la STM+C seleccionada. Su horizonte temporal es anterior a la denominada "Fecha de inicio" para cada sección (sistema, subsistema, componente) la cual comienza una vez emitido el Certificado de Aceptación Provisional. Los pasos básicos propuestos para esta fase se muestran en la figura 57 del presente trabajo de tesis.

La infraestructura de apoyo para el desarrollo de esta etapa y las bases propuestas para su despliegue, puesta en marcha y calibración de la STM+C, quedan recogidas en las figuras 122, 123 y 124:

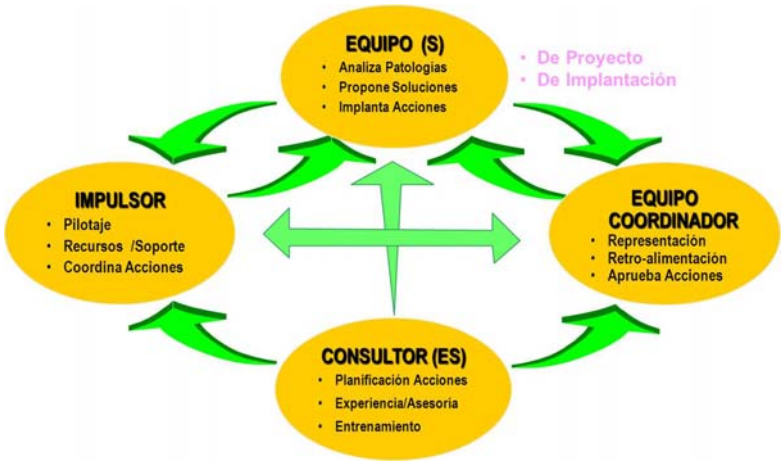


Figura 122: Infraestructura de apoyo.

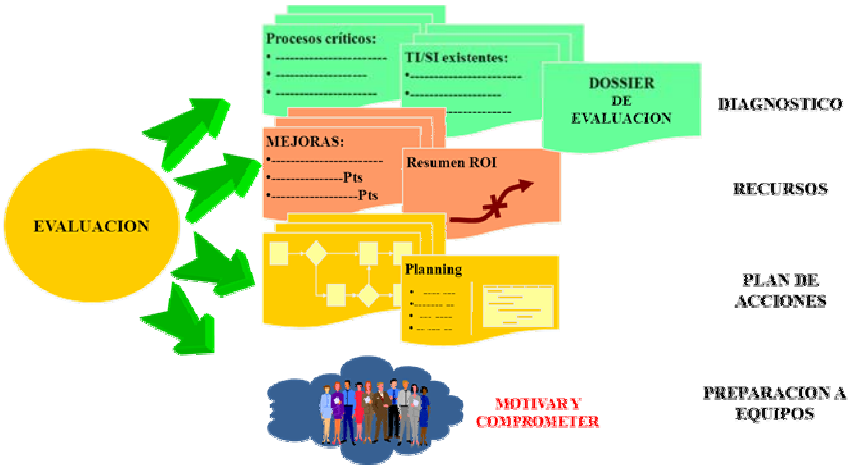


Figura 123: Bases para el despliegue.

La operativa propuesta para la puesta en marcha y calibración de la STM+C elegida sería (figura 21):

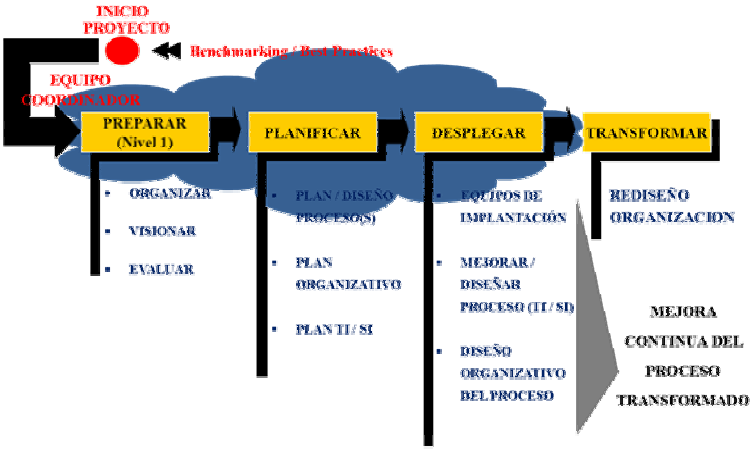


Figura 124: Operativa de implantación. Puesta en marcha de la STM+C.

CONCLUSIONES.

En un planteamiento orientado hacia el ciclo de vida del sistema (ingeniería concurrente), las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo. Para garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo son claves, dentro del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C, los siguientes elementos:

- El análisis de las garantías de desempeño, para cada alternativa. El objetivo es doble: comprometer/garantizar contractualmente las "condiciones de suministro / servicio posibles" y evitar la repercusión de los errores de diseño/decisión sobre el cliente o usuario final.
- La construcción de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonus).

Para los sistemas técnicos de producción continua (plantas de producción de energía, gas, petróleo, parques eólicos, autopistas de peaje, etc.) y los nuevos contratos integrados, los "Costes diferidos de producción" hacen referencia a la penalización establecida en contrato por incumplimiento de las condiciones de suministro/servicio. Su impacto sobre el LCC puede llegar a ser muy importante si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Luego, para este tipo de industrias, o similares, y para el nuevo contexto de contratación, es un término muy importante a tener en cuenta en el cálculo de la "componente de coste total" del ciclo de vida del sistema. Por este motivo, es fundamental establecer un instrumento que permita la conversión, en términos económicos, del coste diferido (penalización), o "beneficio diferido" (bonificaciones), para mejorar la pre - cisión y exactitud de la componente de coste total en el proceso de selección de la mejor alternativa en la fase de diseño.

- El análisis de escalabilidad. Permite establecer una "ordenación/secuenciación" de la gama de alternativas posibles en base a las restricciones y las dinámicas consideradas.
- El LLCA-dynamic (basado en el análisis de riesgos). Es importante para sopor- tar la toma de decisiones en el proceso de evaluación de diferentes alternativas que compiten entre si. El análisis LCC debe predecir/estimar los costes, el tiempo de operación y las actividades de mantenimiento a realizar para el ciclo de vida proyectado.

La Gestión del Mantenimiento representa una de las funciones básicas para soportar la gestión de operaciones. Sin embargo, a nivel técnico, es muy poco frecuente encontrar instrumentos que permitan conectar las actuaciones de mantenimiento con la repercusión económica que estas actuaciones tienen sobre la rentabilidad del sistema y, consecuentemente, sobre la cuenta de resultados.

Resulta importante examinar las diferentes situaciones de producción (productos vs. procesos), y las impuestas por el mercado (ciclos, competencia, avances tecnológicos, otras), desde el punto de vista de la Planificación del Mantenimiento a fin de diseñar un sistema robusto, confiable y flexible que dé una respuesta eficiente y efectiva a la estrategia de Gestión de operaciones. Por tanto, es necesario un modelo que brinde la posibilidad de realizar un análisis exhaustivo de alternativas y permita evaluar y comprender sus estructuras de costes para el diseño de soluciones equilibradas en las dimensiones técnicas y económica-financieras mediante la consideración de todos los criterios simultáneamente (Integrated multicriteria decisión making: IMDM). Ello permitirá, además, valorar las sinergias de las rela - ciones entre los diferentes parámetros a la hora de configurar las alternativas posibles

e identificar las variables de interés/críticas implicadas en la toma de la decisión (variables de decisión).

De la aplicación del trabajo de investigación desarrollado para el diseño de STM+C al caso práctico considerado, se extraen las siguientes conclusiones generales:

- Para que la STM propuesta cumpla con las funciones que se le exige a largo su ciclo de vida, a nivel técnico y económico, es necesario realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar con objeto de determinar y conocer sus principios de funcionamiento e identificar las categorías y la estructura de costes significativos.
- Un buen diseño mejora la fiabilidad y favorece la confiabilidad, competitividad y la sostenibilidad.
- El conocimiento de la estructura y composición de los costes del ciclo de vida de un activo es esencial para una acertada y rentable gestión del mismo en la fase de operación/ explotación.
- Para reducir los niveles de incertidumbre de la solución seleccionada en la fase de adquisición (salida del nivel 1) es necesario una acertada integración de: Equipo multidisciplinar (agentes responsables + expertos + analistas) + (Técnicas semicuantitativas).
- El desequilibrio existente entre los costes de adquisición y propiedad refuerza la conveniencia de comprometer al personal que gestiona la fase de operación (Mantenimiento , operación, almacenes, compras) en las etapas de diseño de la STM.
- La formulación consensuada de las garantías es básica para una apropiada evaluación y cuantificación de los denominados “costes diferidos de producción” y los trade-off vinculados al diseño STM y la estrategia de negociación.
- Los “costes diferidos de producción” tienen un peso importante en el coste total de cada alternativa. Son un buen indicador para cuantificar la eficiencia y efectividad de cada alternativa.
- Desde un punto de vista económico, los equipos de fabricación deben contemplarse como un medio para generar ingresos a través de la realización física de la idea de negocio. Por tanto, las situaciones que generan indisponibilidad de las instalaciones productivas repercuten negativamente en la rentabilidad.
- Un elemento importante e interesante del proceso de decisión para el diseño y selección de la STM+C es el “Proceso de óptimos anidados” propuesto en este trabajo para la búsqueda de óptimos globales. Este proceso influye en la precisión y exactitud de los cálculos del OPEX, y por tanto, en la curva de coste total y el intervalo de LCC mínimo.

El caso de aplicación considerado muestra la viabilidad e importancia del modelo propuesto para resolver, de forma estructurada y base científica, el problema de ingeniería de optimización multiobjetivo (POM) formulado.

CASO 3: PROYECTO DE INFRAESTRUCTURA PARA LA EJECUCIÓN DE UNA PISTA DE ATERRIZAJE Y UN DIQUE DE ABRIGO. PROCESO DE DECISIÓN MULTIETAPA PARA EL DISEÑO ÓPTIMO Y SELECCIÓN DE LA STM+C DEL "SUBSISTEMA CENTRAL HORMIGONERA".

En este tercer caso se aplica la metodología desarrollada para apoyar, de forma informada, la toma de decisiones en el diseño del proyecto y la estrategia de nego - ciación para un concurso de infraestructura militar para la ejecución de un aeropuerto y un dique de abrigo.

El estudio se aplica al diseño, configuración y selección de la STM+C del subsistema crítico (central hormigonera) para la producción de hormigón para que cumpla los plazos y requisitos señalados por el cliente en el pliego de condiciones correspondiente a esta etapa del proyecto.

La duración estimada del proceso de hormigonado es de 6 meses. La ejecución del hormigonado está prevista que se realice en dos fases diferentes:

- la fase 1, correspondiente a la pista de aterrizaje y,
- la fase 2, correspondiente al dique de abrigo del puerto anexo a esta instalación.

Las garantías de desempeño establecidas para la central hormigonera son:

- Fiabilidad de la central hormigonera:
  - Fase 1: 99,8 %
  - Fase 2: 100 %
- Disponibilidad:
  - Fase 1: 98 %
  - Fase 2: 98.5 %
- Downtime menor de 177 horas.

Para garantizar el suministro continuo de hormigón, analizadas las características del proyecto, el nivel de criticidad del subsistema a diseñar y seleccionar, y las restri - cciones a las STM impuestas por el emplazamiento (recinto militar y las estructurales propias de una isla), se decide concursar con una oferta que incluye la compra de una central hormigonera "desmontable" (en la isla no existen otras alternativas viables) que deberá cumplir los requerimientos obligatorios (normativos, legales, etc.) y los estable - cidos por el cliente.

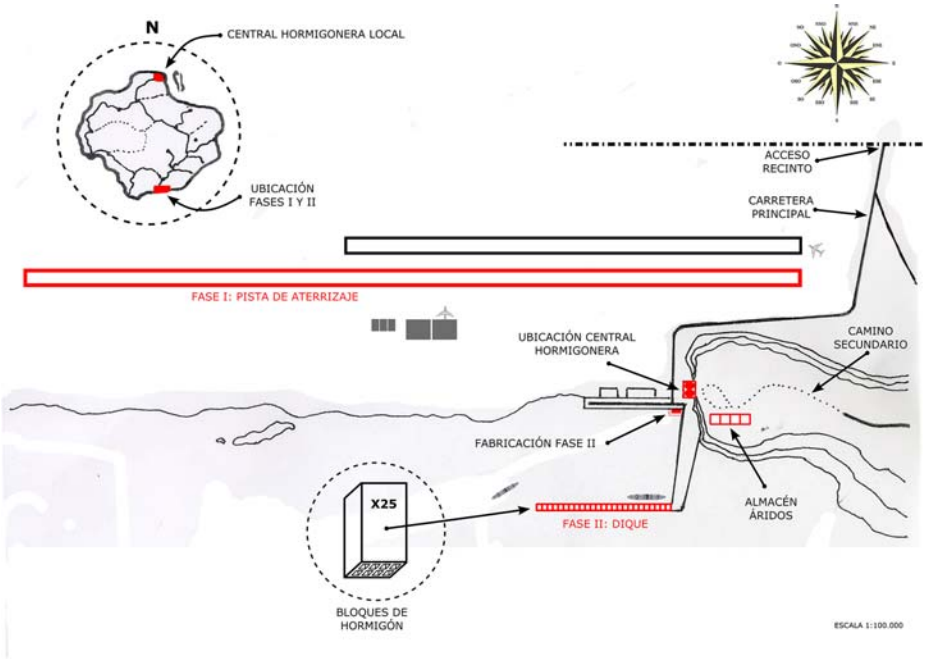


Figura 125: Plano básico de emplazamiento y distribución.

En este contrato es necesario un diseño riguroso y una orientación hacia la gestión del ciclo de vida del subsistema, en la fase de diseño, en base al interés y objetivos del cliente.

En el diseño y selección del subsistema se investigan diferentes alternativas para encontrar el mejor equilibrio entre CAPEX, OPEX, desempeño, y la estrategia de mantenimiento, para el ciclo de vida establecido (seis meses). Se estudian las compen - saciones (positivas y negativas) y se introducen variables opcionales en el análisis de la solución, como:

- Opción de recompra y/o el desmontaje de la instalación.
- Adquisición de un kit de mantenimiento de elementos identificados como criti - cos para el periodo de vida establecido para el subsistema.
- Contratación de un software de control de averías y servicio técnico de apoyo y actualización.
- Formación in-situ, durante dos meses, por parte del servicio técnico de la em - presa suministradora de la central del personal de operación del subsistema.

Como el uptime es clave en la estrategia de operación, la disponibilidad (o mejor la indisponibilidad) se convierte en el objetivo principal de la gestión del mantenimiento.

En el proceso de toma de decisiones el analista ha de tratar con un problema MCDM (*Multiple criteria decision – making)* complejo, con múltiples variables, múltiples restricciones y con objetivos normalmente en conflicto. Se trata de un problema de ingeniería de optimización multiobjetivo (POM) en el que la toma de decisiones informada en el nivel 1 es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos del proyecto. Esto hace el caso seleccionado apropiado para aplicar la metodología propuesta en el capítulo III de este trabajo de tesis.

1. PREMISAS DEL ANÁLISIS.

La experiencia obtenida de la aplicación del análisis LCC durante los últimos 40 años demuestra que el 70%, o más, de los gastos de operación y los asociados a la falta de fiabilidad son comprometidos en las etapas de concepción y diseño. La posibilidad de influir sobre estos costes se ve muy reducida una vez que el proyecto se ejecuta y pone en funcionamiento. Ello pone en evidencia que las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un sistema, subsistema o componente, tienen el mayor impacto potencial sobre el LCC total del mismo (figura 126), y por tanto, sobre el factor de sostenibilidad económica y funcional de la inversión.

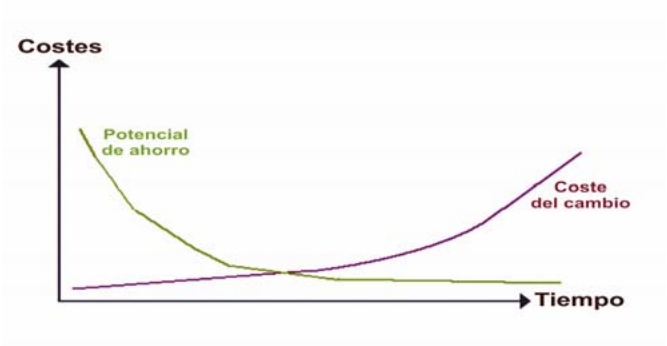


Figura 126: Beneficio de la detección temprana de problemas. La rentabilidad económica de la eficiencia.

Es importante, en la fase de diseño del proyecto, un enfoque integrado de aspectos como la fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad (RAMS), los cuales dependen del ciclo de vida del sistema.

Por tanto, resulta fundamental que el analista (contratista) disponga de una meto- dología que le permita investigar e innovar sobre diferentes alternativas de diseño para

seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre los requerimientos asociados a la "componente de valor" y la "componente de coste total", sobre el ciclo de vida establecido.

La información de los modos de fallo, y sus consecuencias, y una buena compren - sión de la relación coste de la dimensión riesgo (*RDC*) vs. coste de los recursos (Re*DC*), para cada alternativa, será fundamental para la definición de las *garantías de desempeño y las ecuaciones de compensación* en la *fase de Diseño Definitivo.*

El resultado ha de ser un informe detallado de alternativas coste efectivas (alterna - tivas STM+C) el cual incluya información técnica, de O&M*(Operación & Mantenimiento)*, de costes y coste total, para cada alternativa.

El proceso de decisión para la optimización del diseño y la planificación y control dinámico de la O&M se estructura en dos niveles (figura 127):

- *Nivel 1: Fase de adquisición. Definición de alternativas STM+C.*

Se definen las actuaciones a llevar a cabo durante la gestión de la inversión.

- *Nivel 2: Fase de operación. Control y Gestión dinámica de la O&M del sub – sistema.*

El objetivo es mejorar el nivel de competencia de la planta/sistema mediante la búsqueda de alternativas, altamente optimizadas, para el equilibrio dinámico sistema – entorno.

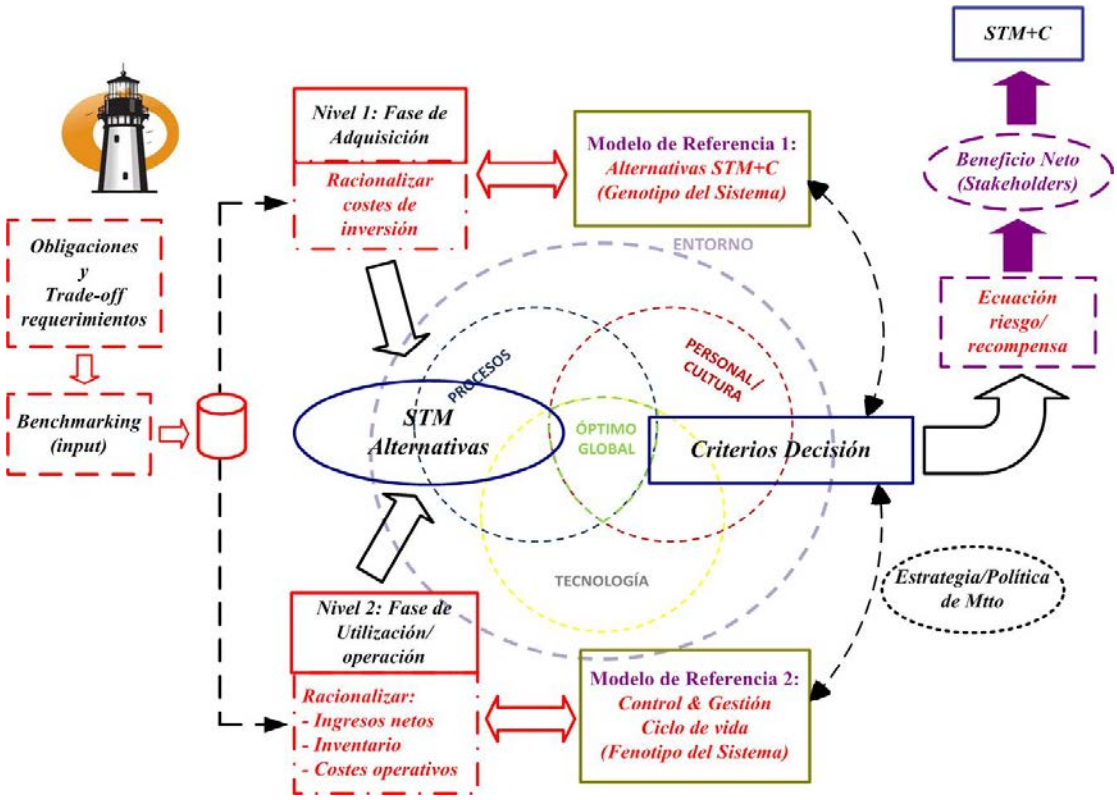


Figura 127: Sistema Conceptual para el diseño STM+C: Ingeniería concurrente. Diseño orientado al ciclo de vida.

1.1. Objetivos.

Para garantizar el máximo beneficio, en la fase de operación, es importante la optimización del subsistema, en la fase de diseño, para mejorar su eficiencia y alcanzar la máxima efectividad, "productividad real neta" y el máximo ROFA. Se consideran los siguientes objetivos básicos:

(a) Definición de soluciones STM+C.

(b) Apoyar la toma de decisiones en el Diseño de la Estrategia de Negociación en la fase de perfeccionamiento del contrato.
(c) Determinación de los términos críticos que son negociables, y sobre los cuales existe capacidad de actuación.
(d) Definición de las Garantías y Compensaciones.

Se trata de brindar al analista una herramienta para dos fines básicos:

- investigar, comparar, innovar y diseñar Soluciones Técnicas y de O&M.
- Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total para el ciclo de vida considerado.

1.2. Alcance.

El alcance viene determinado por los servicios y obligaciones que tiene que realizar y cumplir el Contratista según lo establecido en el Contrato de acuerdo con los "Requisitos del Cliente". Para cumplir con estos requisitos, el Contratista debe, con objeto de tener una descripción de los detalles del alcance y condiciones del trabajo, realizar los siguien - tes estudios:

(a) Validación del emplazamiento (Affordability analysis). Determinación de la E.P..

El emplazamiento para la construcción del proyecto representa una restricción al dominio de la solución. Su análisis es importante para evaluar la eficiencia de la solu - ción técnica propuesta.

(b) Evaluación de las Condiciones de realización del proyecto. Estimación de acciones, restricciones (legales, medioambientales, otras), recursos y materiales para las diferentes configuraciones. Definición de opciones (gama de alternativas STM).

(c) Evaluación de la disponibilidad máxima garantizada para cada fase de producción y la producción máxima estimada para las alternativas STM(i).

(d) Estimación de los Costes totales para las i - alternativas ($C_{Total}(i)$).

(e) Determinación de la gama de alternativas STM+C y estrategia de negociación en función de las restricciones y "Requisitos del Cliente".

2. FUNDAMENTOS PARA LA EVALUACIÓN TÉCNICA DE ALTERNATIVAS. FAC - TORES DE DISEÑO.

El proyecto de infraestructura considerado es un proyecto complejo, tanto en su diseño como en su ejecución, en el que hay que considerar diferentes subsistemas y componentes en la fase de diseño: hormigonado, balizamiento, iluminación, señaliza - ción, sistema de túneles de mantenimiento, etc. Un subsistema crítico para ambos sistemas técnicos (puerto y aeropuerto), es el *subsistema hormigonado*.

Este subsistema, además de ser la partida más elevada del proyecto, representa el *corazón de la obra*. La ejecución del proceso de hormigonado, en el tiempo y características previstas, es vital para el cumplimiento de los plazos establecidos para el resto de las fases del proyecto.

Se identifica, como factor crítico para el éxito del proyecto, la necesidad de contar con una central hormigonera que garantice una producción de hormigón al ritmo pro - gramado y adecuada a la resistencia y calidad demandadas en cada fase del proyecto.

2.1. Hormigón.

Es la amasada correspondiente a la mezcla en proporciones adecuadas de cemento, áridos, agua y aditivos, según su fórmula. Su uso está regulado en España en la EHE (2008).

El pliego de condiciones de la obra determina los tipos y resistencias que deben tener los hormigones en cada fase. La central hormigonera deberá ser capaz de producir ambos tipos de hormigón en la cantidad y ritmo exigidos.

El estudio previo revela la carencia, o baja calidad en la isla, de los materiales

necesarios para su fabricación, lo que obliga a una búsqueda exhaustiva de alternativas adecuadas a cada componente.

Se distinguen dos clases de hormigón, según la fase y el ambiente marino. La resistencia viene impuesta por el contratante y será la misma para ambas fases:

Fase 1: HA-30/B/20/IIIa. Ambiente marino aéreo.

Fase 2: HA-30/B/20/IIIb. Ambiente marino sumergido.

La fórmula para la producción del hormigón (tabla 29) será la misma durante el proceso de hormigonado de cada fase con objeto de favorecer un ritmo constante en la producción de la central.

Tabla 29: Fórmula para la fabricación del hormigón.

MATERIALES		Cemento	Árido 2	Árido 3	Árido 4	Agua	Aditivo
		CEM I 42,5 SR	10\20	0\5	5\10		G.WRDA 90 HSR
FÓRMULA		KILOS	KILOS	KILOS	KILOS	LITROS	LITROS
HA-30/B/20/IIIa/1	**1 m³**	400	950	650	200	180	0,916666667

Los materiales empleados son determinantes para la fabricación de un hormigón resistente cuya calidad no afecte a la producción de la central. Se realiza un estudio de los mismos, con dos objetivos básicos:

1. Conseguir una calidad óptima. Una resistencia por debajo de normativa obligará a rechazar la amasada con la consiguiente pérdida de producción y tiempo .
2. Impedir una rotura de stock de cualquiera de los materiales empleados.

2.2. Materiales.

2.2.- 1. Áridos.

Se identifica un único suministrador con cantera propia y capacidad para el trans - porte continuo a la central hormigonera. La distancia de la cantera a la obra es inferior a 5 minutos. La cantera dispone de machacadora y también cuenta con árido rodado.

Dado que se dispone de una amplia zona libre se habilitará, junto a la central hormigonera, y para garantizar el suministro, una zona para la recepción y almacenaje de hasta 400 t por cada tipo de árido. Para el acopio de áridos se drenará la zona de tierra habilitada. Se asegurará que el acopio no produzca contaminación entre ellos mediante separación física. No se utilizará los primeros 15 centímetros de estos acopios. El suministrador se hará cargo del llenado de las tolvas de la central de hormigón, para lo que se le exigirá una excavadora dotada de pala (2 m^3) y un palista las 24 horas. El suministrador tendrá siempre una segunda pala disponible en su parcela y hará un acopio equivalente a 3 días de producción de los áridos necesarios para la obra. El transporte se realizará con camiones basculantes.

Se consensuan penalizaciones en el contrato de suministro.

Las características químicas del árido de la isla rayan los parámetros exigidos por el artículo 28 de la EHE. Los ensayos físico-químicos muestran que están en el límite inferior de la norma, lo que afectará a la baja la resistencia final del hormigón.

Se utilizarán tres fracciones de acuerdo a la UNE-EN 993-2:

- Arena o fino. Tamaño de 0/5 mm 0/4 AF UNE-EN 12620, UNE-EN 13043.
- Gravilla. Tamaño de 5/10 mm 6/12 AG UNE-EN 12620, UNE-EN 13043.
- Grava o árido grueso. Tamaño de 10/20 mm 12/32 AG UNE-EN 12620, UNE-EN 13043.

Toda fracción de árido recepcionada se hará de acuerdo a la normativa vigente. Se realizarán los ensayos en la forma, frecuencia y alcance establecido por la EHE, las normas UNE y cualquier otra que sustituya a las anteriores.

2.2.- 2. Cemento. Criterios para la selección del proveedor.

Se identifican dos suministradores en la isla dotados de una pequeña instalación, pero sin problemas de abastecimiento. Los criterios básicos para la selección son:

- Capacidad de suministro de cemento válido para la fabricación del hormigón re - querido.
- Disponibilidad para el suministro las 24 horas y transporte del mismo hasta la planta hormigonera.
- Instalación de un silo anexo, como garantía de suministro en caso de incidencia del fabricante, con capacidad para 150 t dotado de sinfín (este tipo de acuerdo es común en grandes obras).
- Información diaria y por escrito a la central hormigonera de los resultados obte - nidos en laboratorio, independientemente de los controles y muestras exigidos por la RC-03 (esta práctica es habitual en las grandes empresas como forma de ajustar sus fórmulas para optimizar sus producciones de hormigón). Por cada partida recibida en la central hormigonera se hará su recepción conforme a las indicaciones exigidas por la normativa vigente en el momento.
- Aceptar penalizaciones (consensuadas entre las partes) en caso de ruptura del suministro que afecte al desarrollo de la obra.

Por razones de confidencialidad se han modificado los nombres de los suminis - tradores. Los cementos ofertados y homologados, con documento acreditativo según la RC-03 española del momento (actualmente está en vigor la RC-08), son:

- Cementos Omega. CEM II B-P 32.5 MR. Oferta: 94 euros/t (puesto en obra*).
- Cementos Isleños. CEM I 42.5 SR. Oferta: 95 euros/t (puesto en obra*).

Ambos cementos presentan una retracción baja, importante cuando la relación de superficie y volumen es elevada.

Se selecciona la segunda opción, por las siguientes razones:

- Presenta la característica SR, lo que amplía las garantías de protección frente a la posibilidad de aguas residuales u orgánicas que se generen en torno al futuro puerto. La característica SR es más exigente en los parámetros químicos, lo que mejora cualquier desviación que pudiera darse con el resto de los componentes del hormigón.
- En el análisis químico se observa un mayor porcentaje de cloruros y sulfatos en el tipo CEM II frente al tipo CEM I.
- En las características físicas se observa un valor más ajustado al que se requiere en el ensayo del Blaine en el tipo I que en el tipo II. Esto favorece un menor tiempo de fraguado del hormigón, sobre todo en la fase 1, lo que reduce los tiempos de curado.
- En el análisis de los áridos disponibles en el emplazamiento, y que se emplearán en la obra, se observa que quedan muy al límite de la norma. Los ensayos de resistencia mecánica por compresión efectuados a 2, 7 y 28 días dan resultados excelentes en el tipo I; sin embargo, los resultados del tipo II rozan el límite inferior en los ensayos efectuados a los 2 días, algo que podría suponer un gravísimo problema en la fase 2.

El cemento SR, aunque inicialmente es la opción más cara, brinda la garantía de alcanzar la resistencia exigida, solventando la falta de calidad del árido referida (2.2.-1).

- La distancia del segundo proveedor a la obra no supera los 20 minutos, frente a los 40 minutos del primero. La cercanía a la obra del proveedor elegido proporciona tiempo de respuesta suficiente en caso de incidencias en el transporte. Dado que el cemento seco no fragua, los tiempos de retraso en la puerta de acceso no influyen en la pérdida de calidad del mismo. Igual ocurre con los áridos. El transporte se hará de forma continua en cubas de 25 t.
- Al tener un menor tiempo de fraguado agiliza la operatividad en la fase 2.

2.2.- 3. Agua.

El agua que llega a la obra cumple plenamente con las exigencias del artículo 27 de la EHE. Procede de la red de abasto de la propia base militar, la cual cuenta además con su propio estanque de almacenamiento con capacidad para 60.000 litros.

Se cuenta con un depósito adicional de 12.000 litros ya instalado en otra fase de la construcción (futuro depósito del parque de bomberos), con autorización para su uso.

Se negocia un suministro externo y alternativo de cubetas de agua con una empresa local para garantizar el suministro en el caso de fallo de la red de abasto o los depósitos.

2.2.- 4. Aditivo.

Se utilizará para mejorar la prestación del hormigón. El aditivo seleccionado deberá cumplir los requisitos del artículo 29 de la norma EHE del 2008.

El tipo de aditivo líquido propuesto es un plastificante G.WRDA 90 HSR. Se trata de reductores de agua de elevada actividad. Este tipo de aditivo permitirá variar la relación cemento y agua para favorecer la manipulación y la resistencia según se requiera en cada momento del hormigón. Estos valores pueden reducirse hasta un 30% en función de la necesidad.

Se identifica un único suministrador con capacidad para cubrir la necesidad de la obra. Para su almacenaje, el distribuidor ha de instalar un depósito de 6.000 litros en zona habilitada en la central de hormigón. Garantiza un suministro de 24 horas mediante cubeta. Se consensuan penalizaciones en contrato en caso de falta de suministro.

Su dosificación se hará de forma volumétrica.

Como medida preventiva, el suministrador cuenta con el mismo producto ensacado, el cual tendrá a disposición de ser usado de forma inmediata en caso de necesidad.

2.3. Central hormigonera. Características básicas para su diseño y selección.

2.3.- 1. Estudio de viabilidad de *Acuerdo de Asistencia Mutua.*

Se identifica, a nivel local, una central hormigonera (a 70 minutos de la obra) viable con capacidad de producción suficiente (1.800m³/día). El estudio realizado para verificar la viabilidad de un acuerdo de asistencia muestra las siguientes limitaciones:

(a) Riesgo de sobrepasar el tiempo de curado del hormigón (90 minutos, máximo).

Dado que la ejecución del proyecto es en recinto militar, a los 70 minutos indicados hay que sumarle:

- el de espera en la zona de acceso a la base que, por motivos de seguridad, veri – fica cada transporte a la entrada (de 5 a 15 minutos. Este tiempo varía ostensiblemente según las urgencias militares, acumulación de otros proveedores; etc.).
- + 10 minutos hasta el punto de descarga.

(b) El número de transportes para mantener el ritmo de suministro planificado en ambas fases es insuficiente.

(c) La planta tiene contrato de suministro con otros clientes, incluidas otras fases del aeropuerto. Por tanto, existe riesgo de ruptura del suministro planificado en algunas de las fases del proyecto.

Los resultados obtenidos indican la inviabilidad de un acuerdo de asistencia mutua con la única opción identificada como viable a nivel local.

Se decide concursar con la opción de compra de una central "desmontable" que se situará dentro del recinto militar. Ello supone considerar en el CAPEX los costes de traslado de la central y de tramitación de las autorizaciones y permisos pertinentes que, por razones de seguridad, se exigen. Esta solución ya fue adoptada en otro proyecto, de idénticas características, por otra empresa que trasladó una central hormigonera al interior del recinto. Luego, los trámites administrativos y los costes asociados al traslado y la tramitación de permisos y autorizaciones están definidos.

Con esta opción se busca dar respuesta a las siguientes situaciones:

- Evitar sobrepasar los tiempos de curado del hormigón.
- Reducir el tiempo de transporte y el número de estos dentro del recinto militar.
- Minimizar la incidencia sobre la seguridad del recinto.

(*) Estas medidas son informadas al departamento comercial para apoyar la oferta en la fase de concurso.

2.3.- 2. Criterios básicos para el diseño y la selección de la central hormigonera.

El tipo y la calidad de los materiales disponibles, las características del hormigón a producir, la producción exigida en base a la planificación de la obra, y la ubicación de la central, influyen en el diseño y selección de la planta.

2.3.- 2.1. Ubicación (figura 125).

Una ubicación cercana a las dos fases es la solución más idónea. Se identifica un pequeño promontorio entre el inicio de ejecución de las dos fases que se aprovecharía para la instalación de las tolvas de áridos. La fase 1 irá avanzando en su ejecución, mientras que el "cajón" de la fase 2 permanecerá anclado frente a la central hormigo - nera. El promontorio facilitaría la caída por gravedad de los áridos en las tolvas, redu - ciendo el coste que supondría soterrarlas.

La distancia de ejecución del hormigonado, en la fase 1, irá aumentando a medida que se avanza en la ejecución de la pista: nunca superará los 10 minutos. En la fase 2, esta distancia es inexistente ya que la ejecución de la obra se realiza in situ.

El almacenamiento del árido se realizaría en la explanada de la base del promontorio.

Por tanto, la ubicación seleccionada para la central es la base del promontorio.

2.3.- 2. 2. Producción estimada.

Los cálculos se realizan, para cada fase, en función del Diagrama de Gantt facilita - do por el contratante. Cada fase tiene un cubicaje diferente y una producción adaptada a cada sistema técnico. La fase 2 (dique) lleva un ritmo de producción más lento debido a que el hormigón ha de estar curado en el momento de su introducción en el agua del mar. En esta fase, el bloque de hormigón se introduce directa y lentamente en el mar durante el proceso de fabricación. Por tanto, la producción se realizará a ritmo constante, pero más lenta, hasta la finalización del bloque. Una vez terminado el bloque ha de limpiarse el dado antes de empezar el siguiente, proceso que dura un día. Este tiempo, dado las características del producto y las consecuencias del downtime, será utilizado como ventana de producción para realizar un mantenimiento oportunista.

En cambio, la fase 1 (pista de aterrizaje), dado que no existen limitaciones de tiempo por fraguado del hormigón, permite acelerar el ritmo de producción, si se considerase necesario *(Este aspecto es tomado en consideración para negociar compensaciones positivas en función a la reducción de los tiempos programados y los efectos sobre los intereses del crédito promotor).*

El consumo estimado de hormigón (tabla 30) para las fases 1 y 2 es el siguiente:

Tabla 30: Consumo total estimado de hormigón fases 1 y 2.

Cubicaje de hormigón de las fases 1 y 2						
		Largo(m)	Ancho(m)	Altura(m)	Nº bloques	Total 1 (m^3)
fase 1:	pista de aterrizaje: m³	2500	45	1		**112500**
fase 2:	bloques de hormigón: m³	15	15	25	25	
		teórico	real			Total 2 (m^3)
	cubicaje de un bloque	5625	3500		25	**87500**
					Total m³ (fases 1 y 2)	**200000**

(*) Los m^3 reales de un bloque se estiman descontando los volúmenes asignados a las cámaras de aire para reflotar el dado.

El cálculo de la producción de la central se realiza en base a datos empíricos (ex - periencia de otras obras ejecutadas anteriormente). Se estima (tabla 31) en 1656 m³/día, durante la fase 1, y de 1000 m³/día, para la fase 2 (el tiempo estimado para la fabrica - ción de un bloque es de 3.5 días).

Tabla 31: Estimación producción diaria de hormigón fases 1 y 2.

(a) Producción diaria (fase 1).   ***Tiempos de carga por hora y transporte:***
Tiempo de carga máximo para cada transporte en la central hormigonera: 5 min.
m³ cargados por cubeta: 6 m³
m³ cargados por hora: (60/5) x 6 = 72 m³/h
m³ / día (23 horas) para la fase 1: 1656 m³/día
(b) Producción diaria (fase 2).   *(Tiempo estimado fabricación bloque: 3.5 días)*
m³ /día (24 horas) para la fase 2: 1000m³/día

El tiempo estimado para el hormigonado de las fase 1 y 2 es de 200 días (según pliego de condiciones). En previsión de posibles retrasos en fases anteriores (explana - ción pista e instalaciones auxiliares aeroportuarias), se consideran (tabla 32) 191,76 días (buffer de tiempo: 8,24 días).

En la fase 1, el tiempo disponible de producción diario es de 23 horas. La hora res - tante, dado las características del subsistema y la naturaleza del producto, se dedicará al mantenimiento y limpieza de la instalación.

En esta fase, el tiempo disponible semanal es de 6 días, dado que se impone 1 día de parada a la semana por logística militar (ventana de producción).

El estudio climatológico de los últimos 20 años durante los meses en que se ejecuta el hormigonado hace desestimar el riego por este factor.

En la fase 2, a la terminación de cada bloque de hormigón se parará 1 día para la limpieza del dado antes de comenzar el siguiente. La ejecución de cada bloque será realizada sin interrupción desde su inicio hasta su acabado.

En esta fase, dado que su ejecución no afecta a la logística militar, el tiempo disponible semanal es de 7 x 24 horas.

Tabla 32: Estimación de los tiempos de producción teórico y disponibles fases 1 y 2.

	Fase 1 (Pista)	Fase 2 (Bloques)	
Producción diaria (m³)	1656	1000	
Total a producir (m³)	112500	87500	
Días efectivos (Uptime)	67,93478	87,5	
Días efectivos + días parada (Uptime + downtime)	79,25725	112,5	
Duración total fase 1 + fase 2 (días)			**191,757246**

3. DEFINICIÓN, CONFIGURACIÓN Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS. PROCESO DE DECISIÓN PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA DEL SUBSISTEMA Y LA SELECCIÓN DE LA STM+C. APLICACIÓN DEL MÉTODO I+I+D.

Se examinará la implementación del método en el proceso de diseño y selección de la mejor alternativa para el subsistema central hormigonera. Se trata de brindar al analista una herramienta para dos fines básicos:

a) investigar, comparar, innovar y diseñar Soluciones Técnicas y de O&M.

b) Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total para el ciclo de vida considerado.

Por tal motivo, se centra el desarrollo del caso en la *Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas.*

Hay básicamente dos tipos de entradas que influyen en los trade-off: las que especifican las condiciones necesarias y suficientes que han de satisfacer la solución para que sea aceptada por el cliente (mandatory); y las que hacen al cliente sentirse más satisfecho (trade-off requirements).

La atención se centra en la minimización del downtime (factor de coste más signi - ficativo) y la maximización de la "disponibilidad contractual" debido a su influencia positiva y directa sobre el proyecto.

Los objetivos básicos son:

• Generar información sobre el nivel de disponibilidad, política de mantenimiento, riesgo específico, costes diferidos (factor de sostenibilidad económica) y coste total.

• Otros resultados son el apoyo informado en el diseño de la estrategia de negociación en la fase de perfeccionamiento del contrato con el cliente (fase de adjudicación), la reducción de la incertidumbre (del coste y de los niveles de eficiencia y efectividad de la solución STM seleccionada) y la minimización del impacto de STM+C sobre el cliente final.

Se comparan y discuten los resultados del proceso de selección de la mejor alternativa con el resultado cuando las garantías de desempeño son introducidas en el análisis; se demuestra que en sistemas técnicos de producción continua e intensivos en capital, las garantías de desempeño (y sus ecuaciones de compensación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa. Por tanto, se consideran un elemento clave que debe ser tenido en consideración en el proceso de selección de la mejor alternativa.

3.0. Benchmarking: Etapa de Investigación (I).

Con objeto de que la STM seleccionada cumpla con las funciones (a nivel técnico y económico) que se le exigirá a lo largo del ciclo de vida, se realiza un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar para determinar y conocer los principios de funcionamiento, identificar las categorías y la estructura de costes significativos, la/s causa/s raíz de los modos críticos de fallos potenciales, etc.

La adopción, de forma conveniente, de las mejores prácticas, ayuda a construir diseños adaptados, más confiables, de mejor calidad y más coste efectivos en O&M.

La finalidad de las conclusiones recogidas en este apartado es servir de base para el debate y la discusión, a nivel técnico, del diseño de las alternativas. Del análisis realizado para la concepción y planteamiento del subsistema, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos específicos:

a) *Planificación.* Buscar oportunidades de innovación adaptadas a las circuns - tancias específicas del emplazamiento, costes y características de materias primas, de - pendencia externa, aspectos relevantes del cliente, etc.

b) *Proyecto.* Emplazamiento, Factor de Layout (F.L.), Factor de Planificación (P.F.), Eficiencia Total, características de las fases, otros.

c) *Ejecución.* Análisis del nivel tecnológico del procedimiento constructivo, nivel de coordinación de los agentes que intervienen, equipo humano, etc., para cada alternativa.

d) *Materiales.* Buscar soluciones que utilicen recursos locales no importados (mayor independencia estratégica); análisis de prestaciones funcionales, etc.

e) *Control de calidad.* Verificar los controles exigidos a cada alternativa.

f) ***Mantenimiento.*** Identificar las diferencias apreciables en las políticas de gestión del mantenimiento para cada alternativa.

g) ***Sostenibilidad.*** Reflexionar desde una perspectiva más amplia para ayudar a valorar las propuestas incorporando, no sólo los aspectos económicos, sino también los sociales, funcionales y ambientales derivados de las alternativas planteadas.

3.1. Fase de diseño conceptual: Etapa de Innovación (I). Arquitectura del sistema.

En esta fase se define el diseño y la configuración inicial del subsistema a nivel abstracto. En función de los factores de diseño definidos (materiales, producción diaria, ubicación, etc.) se establece el siguiente *diseño base* (figura 128) para el análisis de las alternativas:

1. Cuatro tolvas metálicas de 25 t con boca de salida para el almacenamiento de áridos. Una para cada árido, salvo el árido de 10/20, que por su elevado consumo, es necesario alternar en dos tolvas para garantizar una producción óptima. Irán provistas de techo y de muros separadores con capacidad suficiente para la descarga directa de un camión con volquete sobre cada tolva. En la base irán provistas de una rejilla del mismo tamaño que el árido. La parte inferior irá dotada de boca de cierre de cascos que alimentará la cinta pesadora.

   Estarán dispuestas linealmente y la parte superior estará a 1 metro sobre el suelo.

2. Cinta pesadora de 12 m adecuada al diseño de cada alternativa. Irá protegida con bandas laterales que impidan la pérdida de material durante el movimiento de la misma y techo o cierre. Se valorará positivamente la eliminación o extracción del polvo durante el proceso. Deberá estar dotada de pasarela lateral de al menos 80 cm con acceso cómodo a tambores y motor reductor. Pendientes entre 18 y 21 grados.
3. Para el transporte del material hasta la tolva de recepción la cinta deberá ir dotada de cinta nervada para impedir la caída de material debido a la inclinación. La distancia máxima será de 25 m (si fuera necesario, se dispondrían dos o más cintas).
4. Dos silos metálicos de almacenamiento de cemento de 75 t/udad. Los silos irán anclados según las especificaciones del proveedor, correspondiendo a este la obra civil. Un distribuidor alveolar regulará la entrada al sinfín, el cual descargará sobre el elevador de cangilones. El cemento pasará antes por una criba para evitar el clásico rebose por acumulación de piedras de cemento. La criba estará dotada de un conducto de desahogo del sobrante de la criba.
5. El cemento se transporta hasta la amasadora donde se verterá el agua y el aditivo. El cemento utilizará una báscula independiente que permita la regulación de salida de los áridos. El mecanismo de carga ha de estar preparado contra un cierre eventual, antes y después del pesado.
6. Se dispondrá de un filtro principal para la extracción del polvo durante todo el proceso de fabricación del hormigón. El compresor será de aceite. Se situarán estratégicamente tomas de aire dentro de la central para su limpieza; especialmente en la zona de las cintas, filtro, cribas y tolvas.
7. La central hormigonera ha de estar dotada de un pequeño almacén para el control de las muestras establecidas por la normativa EHE y de las que el proceso de calidad interno determine.
8. Producción mínima diaria: 1656 m^3/día.

9. No es necesario un grupo electrógeno en caso de fallo eléctrico ya que la insta - lación militar cuenta con uno capaz de cubrir su propio consumo y el de la planta.

10. Todo el proceso podrá ser operado manual o automáticamente desde la cabina de control. Se incluye el software de control de la planta y dos puestos de trabajo (una mesa principal y una auxiliar).

11. Se introduce un *apartado de opciones* al diseño para mejorar el preventivo / predictivo y reducir el RDC:

- *Stock de consumibles y elementos críticos.* La cantidad varía según la alternativa considerada. Para su estimación y cálculo se han analizado los manuales de mantenimiento de todas las alternativas, escogiendo como referencia base el más amplio de los cuatro.
- *Software de control de averías y mantenimiento (Predictivo).* Permitirá una gestión interna rápida y planificada y un control externo por parte del equipo técnico del suministrador.
- *Servicio Técnico de formación.* Será impartido por personal técnico del proveedor. El objetivo es formar y dotar al personal de explotación en herramientas de gestión eficientes en todos los aspectos internos de la central hormigonera (mantenimiento, reparación, aumento o disminución de producción, etc.). El periodo mínimo de formación será de dos meses.

(*)La formación irá acompañada de una certificación del fabricante y parte de ella será sufragada por el fondo para la formación que la empresa ha de disponer anualmente por el trabajador (480 euros/año).

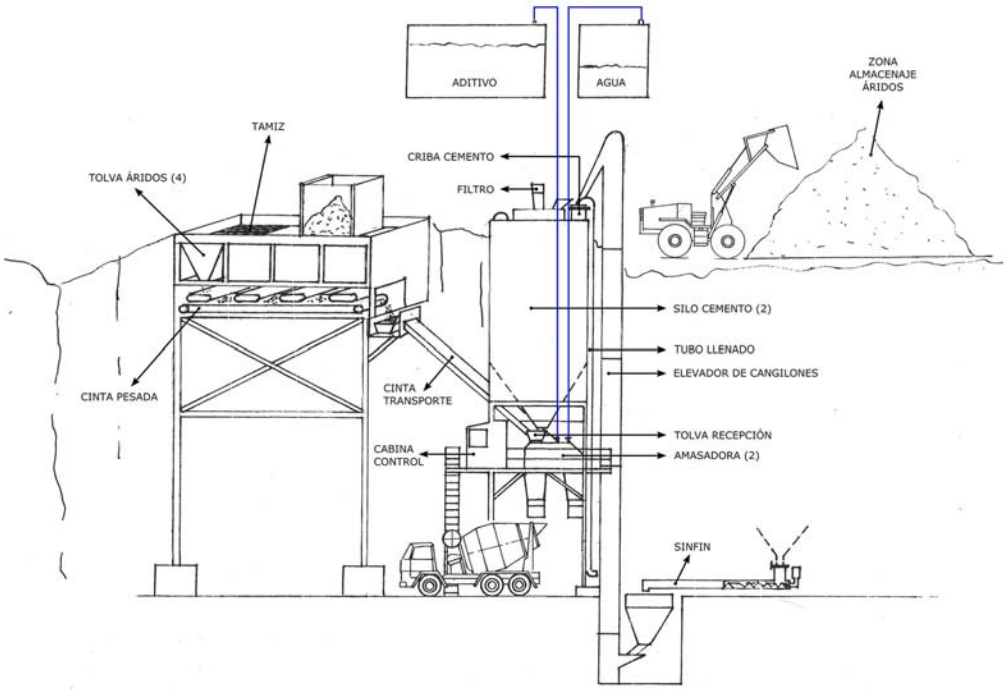


Figura 128: Diseño base de la central hormigonera.

- *Recompra de la instalación.* Se establece la posibilidad de recompra por parte del proveedor, pactándose un porcentaje fijo y otro variable en función del estado final de la instalación.

La central hormigonera "desmontable" ha de contar con los certificados necesarios para su instalación y montaje, funcionamiento y puesta en marcha, conforme a la normativa vigente del lugar de emplazamiento. El tiempo establecido será de 2 meses, desde la aceptación en firme, mediante firma de contrato con penalización en caso de

incumplimiento.

Se acuerda una puesta en marcha de 3 días con técnico del proveedor.

3.2. Fase de diseño Preliminar: Etapa de Desarrollo (D). Arquitectura de los subsistemas.

En esta fase se define la configuración inicial del subsistema (tabla 33) y se consi - deran la gama de alternativas (con diferentes especificaciones técnicas, de operación y necesidades de mantenimiento). El objetivo es la definición refinada, en términos funcionales. Es preparatoria para la definición a nivel de componentes.

En el diseño de la Solución Técnica, de Operación y Mantenimiento (STM) se consideran no sólo aspectos funcionales, sino también factores económicos y otros as - pectos vinculados al problema de diseño (emplazamiento, restricciones a la subcontra - ción**,** restricciones legales**,** garantías, soporte logístico, entre otros).

P1: Análisis de requisitos. Requisito de sostenibilidad.

Se analizan los requisitos RAMS para el proyecto y se distribuyen a los diferentes subsistemas.

Se plantea como aportación, la evaluación de las alternativas introduciendo las compensaciones (positivas y negativas) en el proceso de decisión.

En el LCCA se considera clave tener en cuenta el coste de la indisponibilidad. Se parte de la hipótesis de que es un coste importante para todas las alternativas.

P2: Análisis funcional y asignación de requisitos.

En este paso se seleccionan y definen los criterios para evaluar las alternativas y se determinan las especificaciones de funcionamiento (trade-off requirements). Los criterios para la evaluación se extraen de los requerimientos de desempeño especificados por el cliente, a partir de los cuales, se desarrollan los trade-off que serán usados para evaluar y clasificar (puntuar) las diferentes alternativas. Los criterios de evaluación son: fiabilidad, disponibilidad, downtime, CAPEX, costes de mantenimiento y costes de riesgos específicos. Los trade - off utilizados para evaluar las alternativas son:

- Fiabilidad de la central hormigonera:
  - Fase 1: 99,8 %
  - Fase 2: 100 %
- Disponibilidad :
  - Fase 1: 98 %
  - Fase 2: 98.5 %
- Downtime menor de 177 horas.

P3: Alternativas para el subsistema. Gama de alternativas.

En este paso se identifican y evalúan diferentes configuraciones de diseño (alternativas). Se seleccionan, para una producción de 1656 m^3/día, cuatro tipos diferentes de centrales “desmontables”. Para definir las alternativas se tiene en conside - ración aspectos estructurales (dimensionamiento), funcionales, ambientales, constructi - vos y económicos (precios de mercado).

La tabla 33 muestra un resumen de las cuatro alternativas y sus características básicas:

Tabla 33: Configuración básica y alternativas.

Configuración base		**Alternativas**			
Componente	**Nº**	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Producción neta (m^3 / día)	1656	1780	2000	1850	1700
Tolvas de alma-cenamiento de áridos de 25 t con bocas de salida	**4**	✓	✓	✓	✓
Cinta nervada re cepción áridos con células de pesada de hasta 5,000 kg de 12 m y banda late - ral. Pesaje por banda extenso - métricas.	**1**	Células de 4,000 kg	Cinta cerrada con aspiración de polvo. Autoengrasadores	Cinta cerrada con sistema de aspiración de polvo. Autoengrasadores	✓
Cinta nervada elevadora de transporte de 25 m	**1**	✓	Cinta cerrada con aspiración de polvo. Autoengrasadores	Cinta cerrada con sistema de aspiración de polvo. autoengrasadores	✓
Silos metálicos almacenamiento de cemento de 75 t/udad dota - dos de tubo de llenado y de re - boso, sensor de nivel, válvula de seguridad y de salida. Altura inferior o igual a 16 m. Filtro.	**2**	Silos de 100 t distribuidor alveolar	Circuito de aire para su vaciado y aspiración de polvo. Vibrador.	Indicadores de membrana. Dispositivo antibóveda.	✓
Sinfín de 10 m con motor reduc-tor y alma de acero inoxidable.	**1**	✓	Tornillos sinfines de ensamblaje rápido de 5m/udad.	✓	✓
Elevador cangi - lones con motor reductor de 17 m de altura	**1**	Motor de 20 cv	motor de 30 cv	motor de 25 cv	Motor 20 cv
Criba con motor vibrador para la recepción del cemento.	**1**	✓	✓	✓	✓
Tolva de pesa - do y automática con dosificador de cemento.	**1**	100 kg	200 kg	200 kg	✓
Tolva recepción áridos y cemento con salida por eje vertical	**1**	Dosificador volumétrico con doble salida	Tolva pesadora de recepción de áridos	✓	✓
Dosificador auto-mático de agua	**1**	✓	Contador con preselección	Por plasticidad en amasadora	✓
Dosificador auto mático de aditivo	**1**	✓	✓	✓	✓
Mezcladora	**2**	Mezcladora de hélice horizontal	Mezcladora forzada a contracorriente de eje vertical	Turbo-mezcladora de eje veritcal	✓
Plataformas, pasarelas y soportes		✓	✓	✓	✓
					Continúa...

Cabina de control y automa tización del proceso	**1**	✓	✓	✓	✓
Compresor de aire e instalación de alimentación acorde a la nece sidad de planta.	**1**	Hondey 650	Altas cotco 850	Altas cotco 750	Remilli 600
Instalación eléctrica.	**1**	✓	UPS central	UPS equipo	✓
Filtro de aspiración	**1**	6000 litros	8000 litros	6000 litros	5000 litros
Opciones Preventivo/ predictivo					
(A) kit rep.					
1 célula de pesa- da, 2 bandas la - terales, 1 rodillo superior y otro inferior por cinta, 1 repuesto de mangas para filtro de aspira - ción, 2 cangilo - nes de elevador, 1 motor reductor de cinta, 1 ban - da nervada.		kit completo	sólo bandas laterales y 2 mangas filtro aspiración	sólo repuesto mangas filtro	kit completo
(B) Software		sí	sí	sí	sí
(C) Serv. Técnico obra					
Técnico formador. Mínimo dos meses en obra. Dietas, estancia y viajes inclui - dos. Idioma requerido		sí	sí	sí	sí
• **Recompra**					
Precio según estado. Se pacta un 50% inicial pudiéndose alcanzar hasta un 75%, según alternativa, si el estado es óptimo.		50%	50%	60%	no

(*) Los nombres de las alternativas se han modificado por motivos de confidencialidad.

P4: Análisis del factor humano.

El análisis del factor humano es útil cuando sus decisiones influyen en el funcionamiento del sistema.

La central requerirá de (3+1) turnos de 8 horas cada uno. Cada turno requiere 2 operarios polivalentes instruidos en el software, mantenimiento y control de la planta.

El número total de operarios serán 8 (incluyen los del fin de semana).

Se aconseja que ambos sean al menos oficiales de mantenimiento en especialidades diferentes (mecánico, eléctrico, etc.). La polivalencia es un requisito importante.

La formación y la información de los trabajadores son básicas para una efectiva y eficiente operatividad, de ahí que se contemple como opción la formación por técnico formador de los operarios.

P5: Realización FTA.

Esta técnica es de utilidad para el modelizado y análisis de los mecanismos de fallo del subsistema. Para el subsistema en estudio existe poco conocimiento acerca de los mecanismos de fallo. No se disponen de datos específicos sobre las causas raíz de los mismos. Por tanto, es un proceso que habría que iniciar con objeto de disponer de una base de datos rigurosa.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que los modelos de maquinaria van variando con el tiempo y mejorando sus prestaciones, por lo que lo que la información quedaría desfasada rápidamente.

Los datos recogidos en la tabla 34 se obtuvieron, de forma empírica y en tiempo real, mediante el desplazamiento de dos técnicos y un ingeniero industrial a instala - ciones ya operativas con las alternativas seleccionadas. El resultado fue un aumento de la información inicial y la mejora de la configuración sin aumentar significativa - mente el coste.

Tabla 34: Fallos probables para cada alternativa (sin opciones de mejora de preventivo).

	Iberia	Tanen	kopfer	Cemprini
fallos probables (críticos)	4	0	1	5

Estos valores se han obtenido para un periodo de 6 meses. Para la opción Iberia se visitaron 2 instalaciones; para Tanen y Kopfer, 3; y para Cemprini, 4.

P6: Realización FMECA del subsistema. Documentación de los modos de fallo.

En esta fase se identifican y estudian los efectos y las consecuencias de los prin - cipales modos de fallo que pueden ocurrir durante la vida del subsistema (FMEA) y la prevención de problemas, especialmente los calificados como críticos.

Se distinguen dos tipos principales de fallo:

- Fallos no críticos. Son los que no afectan a la producción; por ejemplo, la rotura o desgaste prematuro del rodillo de una cinta no afecta ya que la cinta puede seguir trabajando. Este tipo de fallos no se han tenido en cuenta en la tabla 34.
- Fallos críticos. Los que afectan a la producción; por ejemplo, la rotura de un mo- to reductor de una cinta provocaría la parada de la misma, afectando a la producción.

El análisis de criticidad tendrá por objeto calificar cada modo de fallo de acuerdo a la influencia combinada de la severidad (consecuencia del fallo, si ocurre) y la ocurrencia (probabilidad o frecuencia del fallo). El riesgo de un modo de fallo y sus efectos se determinará por tres factores: la severidad, la ocurrencia y la probabilidad de detectarlo antes de que se produzca (detección); se evalúa a través del *RPN-teórico* y se expresa, en general, en términos de coste. Este valor es utilizado para calificar el nivel de criticidad.

La ocurrencia de un cierto modo de fallo se define de modo empírico (a través de la experiencia de los proyectistas, servicio técnico del proveedor, operadores de planta).

Una vez analizados los fallos críticos, se definen soluciones al diseño. Por ejemplo, se añade un vibrador en los silos de cemento (los silos de Iberia y Cemprini presentan ocasionalmente atascos en la salida del cemento debido a la mayor acumulación de humedad en su interior y un menor milimetraje en la chapa del cono de salida) y se acuerda, por escrito y

proveedores locales, un stock en plaza de los modelos de motoreductores ofertados (Cemprini e Iberia presentan ambos fallos).

La ocurrencia de un fallo crítico tiene como resultado una interrupción de la producción, con consecuencias y costes diferenciados según la fase.

Con la ocurrencia y los efectos – consecuencias de un modo de fallo, el riesgo para ese modo de fallo, el riesgo total de todos los modos de fallo y el coste del riesgo para una alternativa (RDC_i) son calculados para el estudio de las compensaciones.

P7: Análisis de seguridad.

No aplica en este caso dado que todos los componentes deben cumplir la normativa de seguridad vigente.

En el aspecto medio ambiental, en las opciones Tanen y Kopfer el polvo está confinado en espacio cerrado y es extraído mediante aspiración.

P8: Realización ETA. Desarrollo de escenarios posibles.

Este análisis es necesario para identificar los sucesos vinculados a fallos. Ilustra las consecuencias del fallo de un componente.

P9: Análisis del mantenimiento y de garantías.

La función mantenimiento "hereda" un perfil de riesgo desde la fase de diseño (in - geniería) que ha de gestionar en base a las siguientes restricciones: la estrategia de operación, limitaciones presupuestarias y de tiempo.

En general, la razón fundamental del mantenimiento está relacionada con la reducción de las consecuencias del fallo, por lo que los aspectos económicos juegan un papel importante en la planificación de esta función. Generalmente, los costes asociados a la pérdida de producción son considerados como la consecuencia dominante. Por tanto, para la optimización de la función resulta fundamental determinar, con rigor, la relación gasto en mantenimiento vs. coste de mantenimiento (pérdidas de producción, costes de riesgo, etc.) para poder establecer con precisión los trade – off .

Los efectos de un análisis y diseño riguroso de esta función se traducen en una mejora de la disponibilidad, fiabilidad y operatividad, una mayor seguridad, menor nivel de pérdidas de producción, menores efectos medioambientales, costes de mante - nimiento, etc.

El objetivo es la definición y organización de las tareas de mantenimiento para la estimación y valoración de los recursos necesarios para la gestión de la central. Se distinguen cuatro tipos de intervenciones: diarias, semanal, mensual y bimensual.

El plan de mantenimiento, para cada alternativa, se define sobre la base de los manuales de mantenimiento, la información obtenida en P5 y los resultados del FMECA obtenidos en P6.

En la fase 1, la producción diaria será de 23 horas. La hora restante, dado las características del subsistema y la naturaleza del producto, se dedicará al mantenimiento y limpieza de la instalación. Se para 1 día a la semana por logística militar. Esta ventana de producción puede ser utilizada para mantenimiento oportunista y la puesta apunto de la central.

En la fase 2, a la terminación de cada bloque de hormigón, se parará 1 día para la limpieza del dado antes de comenzar el siguiente bloque. La ejecución de cada bloque será realizada sin interrupción desde su inicio hasta su acabado. Por tanto, la parada (ventana de producción) será aprovechada para realizar el mantenimiento necesario (mantenimiento oportunista, $C_tD = 0$) y la puesta apunto de la central.

Se establece un mantenimiento común a todas las alternativas. Indicar que el de las opciones Cemprini e Iberia es más amplio y específico.

Con la información de los efectos asociados al modo de fallo de una alternativa puede ser estimado el número de fallos y la cantidad de downtime esperada para un periodo de mantenimiento. Esta información permite el cálculo de la fiabilidad de la alternativa(i). El uptime puede ser calculado a partir del downtime y el tiempo total de operación. La disponibilidad será calculada a partir del uptime y el downtime.

Cada alternativa tiene diferentes características y necesita una estrategia de mantenimiento diferente (tabla 35).

Tabla 35: Características de mantenimiento de cada alternativa. Estimación del Re*DC*.

Costos de mantenimiento para 190 días

Intervención diaria	**personal**	**cantidad**	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
limpieza cintas	1		x	x	x	x
engrasado	1		x			x
inspección visual	1		x	x	x	x
purgado líquidos y otros	1		x			x
Intervención semanal						
comprobación básculas de pesado	1		x			x
limpieza mangas filtro	1	según filtro				x
compresor	1		x			x
revisión amasadora (paletas)	1		x			x
revisión criba	1	según tamiz	x	x	x	x
revisión bandas y rodillos	1		x			x
ajuste tensores banda	2		x			x
comprobación cangilones	2					x
comprobación automatismos y niveles	2		x	x	x	x
Intervención mensual						
engrasado motores	2	8	x			x
cambios de aceite	2		x			x
revisión amasadora (completa)	2		x			x
compresor	2	1	x			x
Intervención bimensual						
engrasado motores	2	8				
cambios de aceite	2			x		
revisión amasadora (completa)	2		x	x	x	x
cambio tamiz			x			x
Total horas mantenimiento			**115**	**80**	**95**	**130**
Costo mantenimiento (€) (consumibles para 190 días)			**4800**	**3500**	**3700**	**6000**

Dado la naturaleza del proyecto, la función mantenimiento necesita optimizar los niveles de prevención aplicables con objeto de optimizar la capacidad de producción disponible (mucho más crítica en la fase 2). La atención se centra en la minimización del downtime (factor de coste más significativo) y la maximización de la "disponibili - dad técnica" debido a su influencia positiva y directa sobre el proyecto. El downtime resulta un factor dominante cuando el factor de utilización de la unidad de producción

es alto. Es una variable importante para las decisiones de gestión del mantenimiento y para la planificación y control de la producción (reglas de prioridad para gestionar los cuellos de botella, estimación de los tiempos de producción, otras).

El problema de minimización del downtime es complejo dado que depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capaci - dad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambien - tales, entre otros). Por tanto, se considera importante la planificación coordinada del mantenimiento y su soporte logístico en la fase conceptual (preliminar) del diseño.

Un objetivo es mantener un nivel óptimo de fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo.

La reducción del riesgo se puede ver afectada por factores tales como la disponibi - lidad de piezas de repuestos, las habilidades, experiencia y formación del personal y la calidad de los trabajos de mantenimiento. Por tanto, dado la naturaleza del proyecto y las características del emplazamiento, se evalúan tres opciones encaminadas a mejorar el downtime del subsistema y el comportamiento al fallo (tabla 36).Estas opciones afectan al RDC y al CAPEX en el LCCA de cada alternativa.

Tabla 36: Coste opciones para cada alternativa. Efecto sobre el comportamiento al fallo.

	Iberia	**Tanen**	**Kopter**	**Cemprini**
Opciones (predictivo)				
kit de stock mínimo (opcional)	6000 €	3000 €	3500 €	6000 €
software de control de averías (opcional)	1800 €	2100 €	1950 €	1500 €
servicio técnico en obra (opcional)	8500 €	12000 €	10000 €	9000 €
fallos probables (sin opciones)	**4**	**0**	**1**	**5**
fallos probables (con opciones)	**2**	**0**	**0**	**3**

(*) El aseguramiento del estado depende de las decisiones que se tomen durante el periodo de gestión de la inversión y de las que lo controlan durante la operación.
(**) Los datos han sido suministrados por los proveedores de las distintas alternativas. La reducción en el número de fallos se garantiza mediante contrato firmado entre las partes.

9.1. *Análisis de las garantías de desempeño y ecuaciones de compensación.*

El Contratista-analista se enfrenta a un problema MCDM en el proceso de búsque - da de soluciones coste efectivas (gama de alternativas) que satisfagan, bajo las restri - cciones consideradas (atributos del emplazamiento, presupuesto, otras), unos niveles de garantía. Hay tres elementos básicos sobre los que debe pivotar el proceso de integración de la toma de decisiones:

- las especificaciones técnicas de diseño y la planificación de la O&M;
- la disponibilidad contractual + costes;
- las garantías.

El compromiso contractual de un nivel de garantías lleva asociado unos costes, los cuales serán mayores cuanto mayor sean los niveles exigidos o comprometidos contrac - tualmente. Los costes vinculados a un determinado nivel de garantías se obtendrán su - mando las diferentes contribuciones (coste del riesgo, gastos de recursos en manteni - miento, penalizaciones, etc.). Por tanto, para el problema de optimización multiobjetivo considerado, es importante tener una formulación detallada de las garantías, por los si - guientes motivos básicos:

(a) han de ser consensuadas y aceptadas por las “Partes”.

(b) Son la base para cuantificar los riesgos económicos por penalizaciones (Costes diferidos de producción). Las penalizaciones por compensación del downtime y riesgo tienen un peso importante en el coste total de cada alternativa.
(c) Representan un criterio relevante de decisión para definir los atributos de las alter - nativas. Por tanto, contribuyen de forma importante a la determinación de los candida - tos a actuar como variables de decisión en el proceso MCDM.
(d) Representan una buena forma de medir económicamente la efectividad total de una alternativa y de cuantificar su nivel de desempeño.
(e) Es un buen indicador del nivel de sostenibilidad económica de una alternativa.

Las garantías de desempeño establecidas para la central hormigonera son:

- Fiabilidad de la central hormigonera:
  - Fase 1: 99,8 %
  - Fase 2: 100 %
- Disponibilidad :
  - Fase 1: 98 %
  - Fase 2: 98.5 %
- Downtime menor de 177 horas.

9.1.-1. *Ecuaciones de compensación negativa: penalizaciones downtime.*

El hormigonado debe estar finalizado en el plazo programado para cada fase ya que el desarrollo de las siguientes fases del proyecto dependen de el.

En general, la razón fundamental del mantenimiento está relacionada con la reducción de las consecuencias del fallo, por lo que los aspectos económicos juegan un papel importante en la planificación de esta función. Generalmente, los costes asociados a la pérdida de producción son considerados como la consecuencia dominante.

El downtime planificado, o no planificado (fallo crítico), generará una penalización como resultado de una interrupción de la producción, con consecuencias y costes dife - renciados según la fase (tablas 38 y 39).

Es muy importante traducir el downtime (o la indisponibilidad) en términos de coste, aspecto que se considera clave para la selección de la *STM+C* que garantice un nivel de competitividad sostenible en el tiempo (sostenibilidad económica).

Se utilizarán las ecuaciones de compensación para poner en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo propuesto de toma de decisio - nes basado en el riesgo. Obliga al contratista a valorar, a la hora del diseño y configu - ración de la solución, la tasa de compensación.

La fase 2 es especialmente crítica, ya que una parada de la central durante la fabricación de uno de los bloques, en un tiempo superior a las dos horas, haría perder la continuidad del proceso, lo que obligaría a desechar el bloque. Por este motivo, se establece para calcular la penalización en esta fase el valor del coste total de fabricación de un bloque (3.500 (m^3) x 67,2065 (€/m^3)). El objetivo (alta penalización) es obligar al subcontratista a mejorar la disponibilidad y fiabilidad de la central para reducir el nivel de riesgo en esta fase.

En la fase 1 la severidad del downtime es menor. En esta fase, se valora la pérdida de producción por hora (72 (m^3) x 67,2065(€/m^3)) para calcular la penalización.
Se establecen las siguientes compensaciones para el downtime planificado:

Tabla 37: Estimación del coste m^3 de hormigón **(€/m^3)**.

	MATERIALES	Cemento	Árido 2	Árido 3	Árido 4	Agua	Aditivo	
		CEM I 42,5	10\20	0\5	5\10		G.WRDA 90 HSR	
FÓRMULA		KILOS	KILOS	KILOS	KILOS	LITROS	LITROS	
HA-30/B/20/IIIa/1	**1 m³**	400	950	650	200	180	0,91666667	
CONSUMO TOTAL	**200000**	80000000	190000000	130000000	40000000	36000000	183333,333	
CONSUMO DIARIO (Fase1)	**1656**	662400	1573200	1076400	331200	298080	1518	
precio materiales (t)		95	6,15	7,4	6,15	1,8	17	
precio total (por material)		7600000	1168500	962000	246000	64800	168055,556	
costo hormigón	**13441300**							
Precio hormigón (€/m^3)		38	5,8425	4,81	1,23	0,324	17	**67,2065**

Tabla 38: Estimación del factor de penalización por fase y compensación downtime planificado, para cada alternativa.

	penalización (€/hora)	**Compensación downtime planificado fases 1 y 2**				**Criterio compensación**
		Iberia	**Tanen**	**Kopter**	**Cemprini**	
Total horas mantenimiento		115	80	95	130	**fase 1:** Se penaliza el tiempo de manteni -miento superior a 108 horas (177- 69), para cada alternativa. De igual modo, se bonifica el inferior, con respecto a la misma referencia.
Penalización/ bonificación		7	-28	-13	22	
Fase 1 (aeropuerto)	**4838,868**	33873	- 135492	- 62907	106458	
Fase 2 (Bloques)	**235222,75**	$C_t D_2 = 0$				**fase 2:** Por la naturaleza del producto no se permite interrupciones en el proceso de fabricación ($C_t D_2 = 0$).

Penalización Fase 1 = (m^3/hora) x (€/m^3 hormigón); Penalización Fase 2 = (3500) x (€/m^3 hormigón).

(*) Los resultados recogidos en la tabla afectan al OPEX en el LCCA de cada alternativa en la cantidad y signo indicados.
(**) Dado las características del subsistema y la naturaleza del producto, en la fase 1 se dedicará, en el tiempo de producción disponible y con independencia a la alternativa, 1 hora diaria al mantenimiento y limpieza de la instalación. Luego, este término no discrimina en el proceso de selección; sí sumará, por igual, al OPEX de todas las alternativas:

$$\Delta(OPEX\ para\ todas\ las\ alternativas) = 69 \text{ x } 67{,}2065 = 4570{,}042 \in \quad \textbf{(43)}$$

Para cada fase, la ecuación para cálculo de la compensación negativa es:

Compensación downtime programado (ODC) = pactado fase x penalización/bonificación fase **(44)**

Las alternativas con menor mantenimiento reducen las pérdidas de producción por hora, y viceversa; este hecho queda indicado en la tabla con el signo (menos o más, según reduzca o aumente las pérdidas de producción) a la hora de calcular la penaliza - ción en la fase 1.

Para cuantificar el RDC (dimensión riesgo) de cada alternativa y, aunque inicial - mente el efecto de una parada no programada puede ser contrarestado con un aditivo retardante, se establece que esta nunca podrá exceder las 2 horas en su resolución.

Por tanto, cada parada no prevista provocada por un fallo crítico (downtime no planificado) se contabilizará por un tiempo equivalente a 2 horas. Se establecen dife - rentes penalizaciones según la fase. Se considera especialmente crítica la fase 2, ya que una parada de la central durante la fabricación de uno de los bloques en un tiempo superior a las dos horas haría perder la continuidad del proceso, lo que obligaría a desechar el bloque.

Para determinar el factor a aplicar para el cálculo del RDC se acuerda sumar las

penalizaciones (€/hora) anteriores para cada fase ponderadas por la Ley de Pareto (asig na la distribución de probabilidad de fallo a cada fase: 80%, la probabilidad de ocurrencia en la fase 1; y 20%, la probabilidad de ocurrencia en fase 2).

Tabla 39: Factor de penalización y compensación downtime no planificado, para cada alternativa. Estimación del RDC (con y sin opciones).

	penalización (€/hora)	**Compensación downtime no planificado fase 1 y 2**				**Criterio compensación**
(0.8 x Fase 1)+ (0.2 x Fase 2)	**50915,6444**	**Iberia**	**Tanen**	**Kopter**	**Cemprini**	
fallos probables (sin opciones)		**4**	**0**	**1**	**5**	**Penalización:** cada parada no prevista provocada por un fallo crítico (downtime no planificado) se contabilizará por un tiempo equivalente a 2 horas. Se establecen diferentes penalizaciones según la fase y se pondera según Ley de Pareto.
Riesgo (sin opciones)		407346,4	0	101836,6	509183	
fallos probables (con opciones)		**2**	**0**	**0**	**3**	**Riesgo= nº fallos prob. x 2 x penalización**
Riesgo (con opciones)		203673,2	0	0	305509,8	

9.1.-2. *Ecuaciones de compensación positiva: bonificaciones.*

Cada fase tiene un cubicaje diferente y una producción adaptada a cada sistema técnico. La fase 2 (dique) lleva un ritmo de producción más lento debido a que el hormigón ha de estar curado en el momento de su introducción en el agua del mar. En esta fase, el bloque de hormigón se introduce directa y lentamente en el mar durante el proceso de fabricación. Por tanto, la producción se realizará a ritmo constante, pero más lenta, hasta la finalización del bloque. Una vez terminado el bloque ha de limpiarse el dado antes de empezar el siguiente, proceso que dura un día. Por tanto, en la fase 2, la producción está supeditada a la velocidad de fabricación del bloque y no hay posibilidad de aumentarla.

En cambio, la fase 1(pista aterrizaje), dado que no existen limitaciones de tiempo por fraguado del hormigón, permite acelerar el ritmo de producción, si se considerase necesario ***(Este aspecto es tomado en consideración para negociar compensaciones positivas, para la fase 1, en función a la reducción de los tiempos programados y los efectos sobre los intereses del crédito promotor).***

El cálculo de la bonificación (tabla 40) está basado en el interés anual que el Banco de España determinaba para estas operaciones en el año 2006 (3,90%). El importe presupuestado en concurso para la fase de hormigonado era de 30.000.000 millones de euros. La duración estimada para la ejecución de la fase 1 es de 67,93 días.

La tabla 40 muestra la reducción de los tiempos programados, para la fase 1, y los efectos sobre los intereses del crédito promotor, para cada alternativa.

Tabla 40: Reducción de los tiempos programados y efecto sobre los intereses del crédito promotor. Estimación de las bonificaciones para cada alternativa en la fase 1.

			Alternativas		
	Requisitos	**Iberia**	**Tanen**	**Kopter**	**Cemprini**
Producción (m^3/día)	**1656**	**1780**	**2000**	**1850**	**1700**
Fase 1 (m³ totales)	112500				
Fase 1 (días)	67,93	63,202247	56,25	60,810811	66,176471
Reducción temporal (días)	0	4,7277528	11,68	7,1191892	1,7535294
Compensación positiva		**15154,714**	**37440**	**22820,415**	**5620,9025**

$$\text{Compensación positiva} = \left[\frac{30.000.000 \; x \; 3.90}{100 \; x \; 365}\right] \text{x (nº días reducidos)}$$

Las alternativas con mayor capacidad de producción obtienen una mayor bonifi - cación al posibilitar una mayor reducción del tiempo de ejecución de la fase 1.

P10: Cálculo del LCC. Cálculo del coste total *(Los costes son ajustados de forma proporcional por motivos de confidencialidad).*

Un aspecto que refuerza el uso de la metodología LCC en este proyecto es que en la fase 2 la demanda de producción sobre el subsistema aumenta, y con ello, el nivel de stress sobre los equipos de producción, lo que conduce a una caída de la disponibilidad realizada. La solución está en actuar sobre la *disponibilidad inherente* (etapa inicial de diseño y selección).

Uno de los objetivos principales del análisis LCC es cuantificar el "Coste Total de Propiedad" a lo largo del ciclo total de vida establecido para el subsistema.

Es muy importante identificar todos los elementos de costes que de forma signifi - cativa afectan al LCC total. Dado la variedad de sistemas, es difícil establecer un mode - lo universal que permita definir los elementos de costes asociados a cada análisis.

La recomendación generalizada es que se particularice el CBS y las categorías de costes para cada área de aplicación del análisis LCC.

Existen unas categorías de costes que son comúnmente usadas en muchos estudios: Costes de Adquisición y Costes de Propiedad (adoptada por IEC 60300-3-3). Estas dos categorías pueden ser alternativamente denominadas, según ISO15663, como"Gastos de Capital (CAPEX)" y "Gastos de Operación (OPEX)".

Otra categoría de clasificación de costes al más alto nivel del CBS (Cost Break - down Structure) común para las plantas de producción continua (energía, gas, petróleo, etc.) es la siguiente: "Costes de adquisición", "Costes de operación" y "Costes diferidos de producción". Esta última categoría hace referencia a la penalización (penaltis) por incumplimiento de las condiciones de suministro establecidas en contrato (normalmente referenciadas a la cantidad a suministrar en un periodo dado). Su cuantificación se hace, generalmente, sobre la base de la indisponibilidad de funcionamiento del sistema de producción y una unidad de coste del producto (ecuación de compensación negativa). El coste de esta categoría puede tener un impacto importante sobre el LCC si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Luego, para este tipo de industrias, o similares (industrias de proceso continuo), es una categoría muy importante a tener en cuenta en el análisis.

Para el caso en estudio, esta categoría se cuantifica a través de las ecuaciones de compensación recogidas en el apartado *9.1.-1***.**

Las categorías de costes relevantes consideradas para el caso en estudio son: coste inicial, coste de mantenimiento, coste de la dimensión riesgo (RDC) y costes diferidos (penalizaciones). Los costes inicial y de mantenimiento son obtenidos a través de la información proporcionada por el contratista. El coste de la dimensión riesgo se calcula en base a los resultados del FMECA (P6).

- *Desarrollo del perfil de Costes. Árbol de costes.*

En el desarrollo del Perfil de Costes del ciclo de vida del subsistema se distinguieron tres fases básicas:

- Estudio de los Costes de Adquisición: CAPEX.
- Estudio de los Costes de Sostenimiento (comprende los costes relacionados con la operación , mantenimiento ,mejoras, etc.): $OPEX_{básico}$.
- Estudio de los Costes de desmantelamiento y traspaso/eliminación.

La definición del "árbol de costes" para cada fase muestra la información de la estructura y sus elementos de costes (se han excluido algunos elementos de costes de las estructuras por motivos de confidencialidad).

Las estructuras básicas de costes para las diferentes fases, tomando como base esta metodología, se exponen, de forma simplificada, en las figuras 129,130 y 131:

- *Costes de adquisición. Estudio del CAPEX.*

El árbol de costes de la figura 129 identifica algunos de los elementos de los costes de adquisición que fueron considerados en esta fase del ciclo de vida del subsistema.

En esta fase se consideró muy importante para la mejora de la efectividad, la productividad real neta y la reducción de los niveles de riesgo del subsistema, la evaluación de los costes vinculados al plan de formación (por parte de la compañía suministradora), el suministro de repuestos críticos, y las partidas vinculadas a los costes recurrentes (contrato de asistencia con la empresa suministradora: actualiza - ciones, programa de apoyo, mejoras de servicio e integración de componentes, etc.).

Figura 129: Árbol Costes de Adquisición. Estudio del CAPEX.

- *Costes de sostenimiento/funcionamiento. Estudio del OPEX.*

El árbol mostrado en la figura 130 identifica algunos de los costes de sostenimiento que se consideraron en el estudio básico del OPEX:

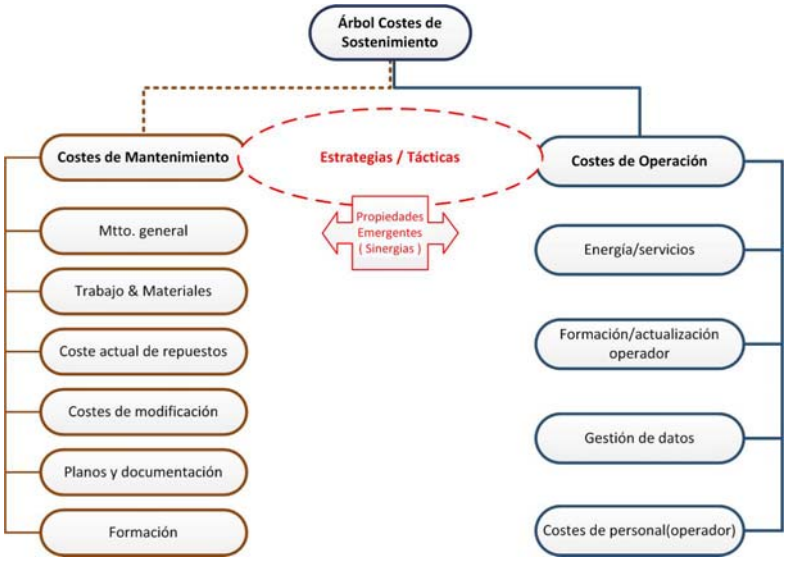


Figura 130: Árbol Costes de Sostenimiento/funcionamiento. Estudio del OPEX.

- *Costes de desmantelamiento y traspaso/eliminación.*

La figura 131 identifica algunos de los costes que fueron considerados en esta fase:

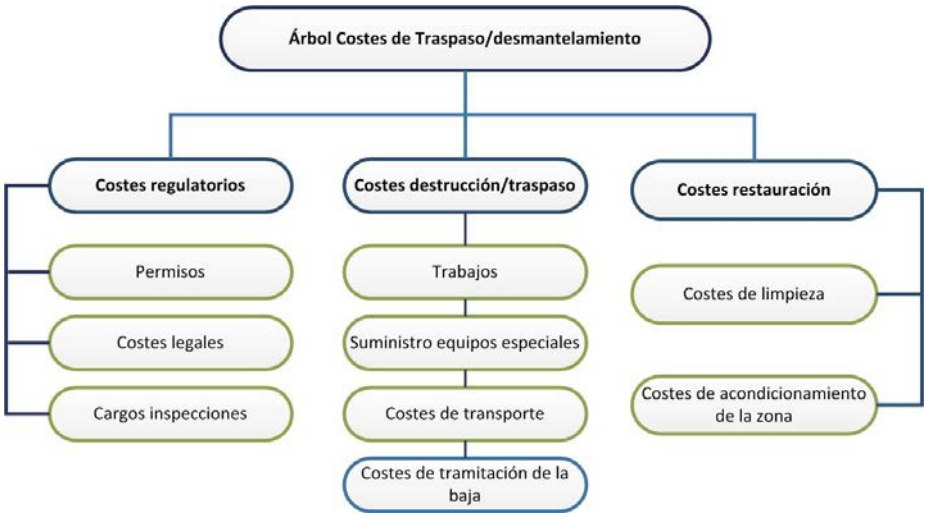


Figura 131: Árbol Costes desmantelamiento y traspaso/venta.

La tabla 41 muestra los recursos necesarios para el desmantelamiento y traslado del subsistema:

Tabla 41: Recursos necesarios para el desmantelamiento del subsistema.

	Desmantelamiento. Tiempo estimado: 2 meses
Personal	
soldador oficial 1ª	
soldador oficial 3ª	
peón	
Grúas	con cesta
60 ton	
40 ton	
15 ton	
equipo soldadura (2 equipos)	
contenedores	
1ª etapa	
corte zonas altas y bajar a suelo para seguir cortando y desarmando	
retirar el material eléctrico.	
2ª etapa	
desmonte o corte de las zonas bajas	
limpieza de las piezas (si van a ser chorreadas puede saltarse esta parte en obra hasta el almacén de destino)	
preparación para su embalado y transporte	

P11: Elección de la STM+C para el subsistema. Matrices de decisión.

En el diseño y selección del subsistema se investigan diferentes alternativas para encontrar el mejor equilibrio entre CAPEX, OPEX, desempeño, y la estrategia de mantenimiento, para el ciclo de vida establecido (seis meses). Se estudian las compensaciones (positivas y negativas) y se introducen variables opcionales en el análisis de la solución, como:

- *Recompra y/o desmontaje de la instalación.*
- *Opciones para la mejora del preventivo / predictivo orientadas a la reducción del RDC.* Dado que el uptime es clave en la estrategia de operación, la disponibili – dad (o mejor la indisponibilidad) se convierte en el objetivo principal de la gestión del mantenimiento. Por este motivo, se analizan las siguientes *opciones:*

  - Adquisición de *kit de mantenimiento de elementos* identificados como *críticos* para el periodo de vida establecido para el subsistema .
  - Contratación de *software de control de averías* y servicio técnico de apoyo y actualización.
  - *Formación in-situ* durante un periodo de dos meses del personal de ex - plotación del subsistema por parte del servicio técnico de la empresa suministradora de la alternativa seleccionada.

El objetivo es la definición refinada en términos funcionales. Los criterios básicos de evaluación son: fiabilidad, disponibilidad, downtime, CAPEX, costes de manteni - miento, costes de riesgos específicos y costes/beneficios diferidos (penalizaciones / bo - ficaciones).

Las tablas 42,43,44,45,46,47,48,49 muestran los datos de costes de las diferentes alternativas sobre la base del R- LCCA(Risk based Life Cycle Cost Analysis). Las figuras 132 a la 137 muestran los detalles gráficos utilizados para el *"análisis técnico relativo"*en el proceso de decisión para apoyar, de forma informada, el proceso de diseño y selección del subsistema en base al desempeño y los trade-off CAPEX vs. OPEX.

Se demuestra que las garantías de desempeño (y sus ecuaciones de compensación) tienen una influencia importante sobre la componente de coste total de cada alternativa. Se consideran un elemento clave que debe ser tenido en consideración en el proceso de selección de la mejor alternativa.

❖ *Comparación y análisis de alternativas. Proceso de decisión multietapa.*

Para el análisis de las alternativas (con el fin de definir y seleccionar un diseño del subsistema orientado hacia la efectividad total) se van incorporando datos al proceso de decisión para apoyar la toma de decisiones en base a trade –off soportados por el refinamiento multietapa, en términos funcionales, de la componente de coste total y el desempeño.

Etapa 1: *Análisis convencional. Comparación sobre la base del CAPEX.*

La práctica habitual (tabla 42) en las decisiones de inversión es tomar como base del proceso de decisión el precio de compra (CAPEX).

Tabla 42. **Etapa 1:** Selección central hormigonera en base al desempeño y CAPEX.

Resultado ranking alternativas	2	4 Peor	3	1 Mejor
Criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,89	100	99,97	99,86
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,80923832	100,7703948	100,3562132	99,40290406
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	80	95	130
Downtime planificado (horas) fases 1 y I2	7	-28	-13	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
(1) CAPEX (€)	**730000**	**850000**	**805000**	**620000**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1 (€)				**230000**

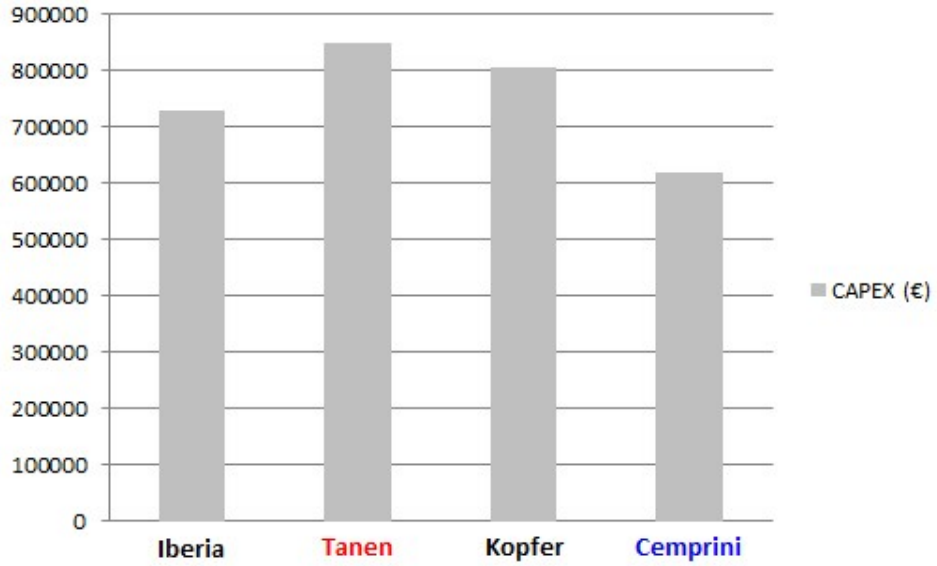


Figura 132: Detalle gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección subsistema en base al desempeño y CAPEX.

En base a este criterio, la mejor alternativa sería la opción Cemprini (opción 1), y la peor, la opción Tanen (opción 4).

Se demuestra, en la próxima etapa, que este criterio es erróneo dado que el CAPEX representa una pequeña parte del LCC.

Etapa 2: *Incorporación del OPEX $_{básico}$ al proceso de decisión. Enfoque al ciclo de vida básico del subsistema.*

El trade-off se realiza sobre la base del coste total (CAPEX + OPEX $_{básico}$) y desempeño (tabla 43):

Tabla 43. **Etapa 2:** Selección central en base al desempeño, CAPEX y OPEX $_{básico}$.
(No se consideran compensaciones)

Resultado ranking alternativas	4 Peor	1 Mejor	2	3
criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,89	100	99,97	99,86
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,81	100	100	99,40
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	80	95	130
Downtime planificado (horas) fases 1 y 2	7	-28	-13	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
(1) CAPEX(€)	**730000**	**850000**	**805000**	**620000**
(3) Coste mantenimiento **(€)**	4800	3500	3700	6000
(4) Riesgo(RDC) **(€)** *(*Sin opciones A+B+C)*	407346,4	0	101836,6	509183
OPEX **(€)** : (suma 3 + 4)	412146,4	3500	105536,6	515183
Coste total (€) :CAPEX + OPEX	**1142146,4**	**853500**	**910536,6**	**1135183**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1(en €)				**288646,4**
Diferencia opción 2 – opción 1 (en €)				**57036,6**

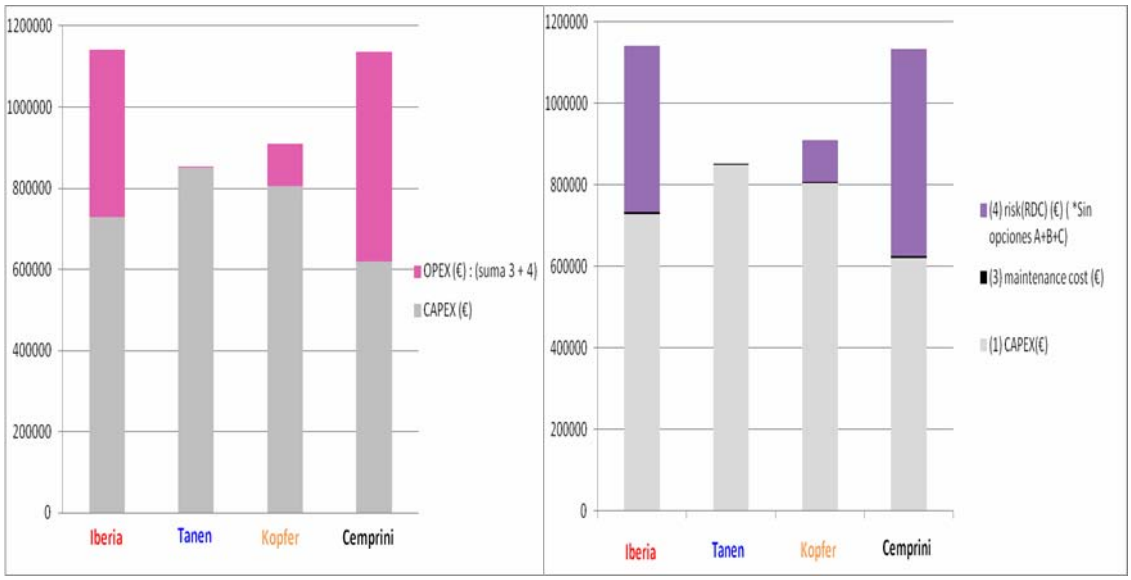


Figura 133: Detalles gráficos para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño, CAPEX y OPEX $_{\text{básico}}$.

Si se introduce en al análisis la componente de OPEX, la mejor opción es la Tanen (opción 1); en el caso anterior aparecía como la peor.

Esta etapa confirma que las decisiones de inversión en base al precio de compra (CAPEX) son erróneas. Ello se justifica por el hecho de que los efectos de adoptar una solución deficiente normalmente emergen en la fase de operación, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.

La tabla 43 muestra que la opción Tanen es la de mayor coste inicial, la más eco - nómica en el resto de las componentes de coste, y la que mejores garantías de desem - peño presenta. También es la que presenta mejor comportamiento en la fase de operación (menor mantenimiento y costo de riesgo: figura 133), y por lo tanto, menos incertidumbre (sostenibilidad económica).

La opción Kopfer (opción 2) está próxima a la Tanen en cuanto a coste total (figura 133); sin embargo, con la configuración actual y los datos de la tabla 43, su comportamiento en la operación, y por tanto su certidumbre, es inferior a la Tanen.

Las alternativas Iberia y Cemprini son significativamente más caras. Ello es debido, en parte, a que necesitan más mantenimiento, lo que se traduce en una mayor indispo - nibilidad.

También se muestra (figura 133) que la opción Cemprini (de menor CAPEX y la mejor clasificada, en la etapa 1) es la de mayor RDC.

Etapa 3: *Incorporación de las compensaciones al proceso de decisión. Enfoque hacia la efectividad total (sostenibilidad funcional y económica).*

Una de las conclusiones extraídas del estudio del Caso 1 (*Proyecto de autopista de nuevo trazado en régimen de explotación indirecta*) fue que las ecuaciones de compen - sación representan una buena forma de cuantificar económicamente la efectividad total de una solución.

Etapa 3.1: *Compensaciones negativas (penalizaciones). Costes diferidos de producción.*

Una categoría de clasificación de costes al más alto nivel del CBS (Cost Break - down Structure) común para las plantas de producción continua son los "Costes diferidos de producción". Esta categoría hace referencia a la penalización por incumplimiento de las condiciones de suministro. Su cuantificación se hace, generalmente, sobre la base de

la indisponibilidad de funcionamiento del sistema de producción (downtime planificado y no planificado) y una unidad de coste del producto. Para este tipo de industrias (industrias de proceso continuo) es una categoría muy importante a tener en cuenta.

Se utilizan las ecuaciones de compensación para poner en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el modelo propuesto de toma de deci - siones basado en el riesgo y para obligar al contratista a valorar, a la hora del diseño, configuración y selección de la solución, la tasa de compensación.

Para el caso en estudio, esta categoría se cuantifica a través de las ecuaciones recogidas en el apartado *9.1.-1***.**

Las categorías de costes relevantes consideradas para el trade-off de la etapa 3.1 son: coste inicial, coste de mantenimiento, coste de la dimensión riesgo (RDC) y costes diferidos.

Tabla 44. **Etapa 3.1:** Selección central en base al desempeño, CAPEX y OPEX.
(Se incorporan **compensaciones negativas**)

Resultado ranking alternativas	3	**1 Mejor**	**2**	**4 Peor**
Criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,89	100	99,97	99,86
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,81	100	100	99,40
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	**80**	**95**	130
downtime (horas) fases 1 y 2	7	**- 28**	**- 13**	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
(1) CAPEX **(€)**	730000	**850000**	**805000**	620000
(2) compensación downtime planificado fase 1 **(€)**	33873	**- 135492**	**- 62907**	106458
(2´)compensación downtime planificado fase 2 **(€)**	0	0	0	0
(3) coste mantenimiento **(€)**	4800	3500	3700	6000
(4) Riesgo (RDC) **(€)** (*Sin opciones A+B+C)	407346,4	**0**	**101836,6**	509183
OPEX **(€)**: 2 + 2' + 3+ 4	446019,4	-131992	42629,6	621641
Coste total (€) : CAPEX + OPEX	**1176019,4**	**718008**	**847629,6**	**1241641**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1 (en €)				**523633**
Diferencia opción 2 – opción 1 (en €)				**129621,6**

Las alternativas con menor mantenimiento reducen las pérdida de producción por hora, y viceversa; este hecho queda recogido en la tabla a través del signo (menos o más, según reduzca o aumente las pérdidas de producción) a la hora de calcular la pe - nalización en la fase 1.

El downtime planificado, o no planificado (fallo crítico), generará una penalización como resultado de una interrupción de la producción, con consecuencias y costes diferenciados según la fase (tablas 38 y 39).

Esta etapa pone en valor para la configuración del diseño de la alternativa y, para el caso en estudio (figura 134), el efecto del mantenimiento sobre producción a través de la cuantificación económica (consecuencias) del downtime planificado y no planificado (RCD).

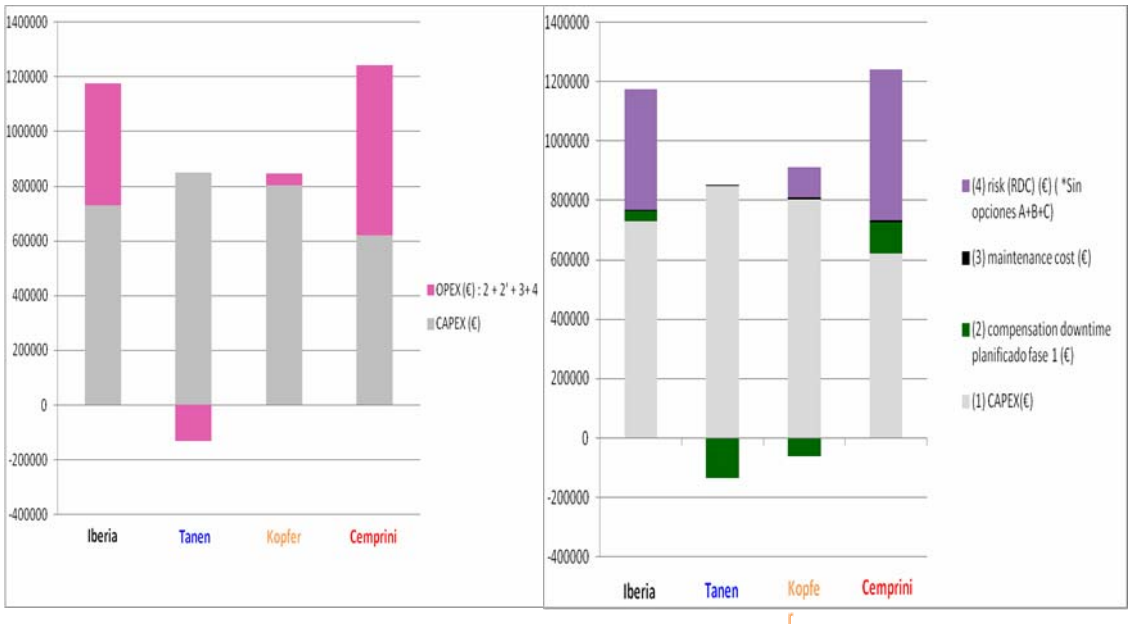


Figura 134: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX . **Se consideran las penalizaciones.**

La tabla 44 y la figura 134 muestra que la opción Tanen sigue siendo la mejor (opción 1), la más económica en el resto de las componentes de coste y la que mejores garantías de desempeño presenta. También es la que presenta mejor comportamiento en la fase de operación (menor mantenimiento, RDC y penalizaciones por downtime planificado), y por lo tanto, menos incertidumbre (sostenibilidad económica).

La opción Kopfer está próxima a la Tanen en cuanto a coste total (opción 2); sin embargo, en base a los datos de la tabla 44, su diferencia, en cuanto a coste total, empeora al introducir las penalizaciones vinculadas al downtime planificado; por tanto, su certidumbre es inferior a la Tanen.

Las alternativas Iberia y Cemprini son significativamente más caras.

Al introducir las penalizaciones, la opción Cemprini pasa a ser la peor valorada (opción 4). También se muestra que el coste total de adquisición de esta opción re - presenta una pequeña parte del coste total acumulado, en el ciclo de vida considerado.

Etapa 3.2: *Compensaciones positivas (bonificaciones).*

En la fase 2, tal y como se detalla en el apartado *P9.1-2*, la producción está supedi - tada a la velocidad de fabricación del bloque y no hay posibilidad de aumentarla.

En cambio, en la fase 1 (pista de aterrizaje), no existen limitaciones de tiempo por fraguado del hormigón, lo que permite acelerar el ritmo de producción, si se considera - se necesario. *Este aspecto es tomado en consideración para negociar compensaciones positivas, para la fase 1, en función a la reducción de los tiempos programados y los efectos sobre los intereses del crédito promotor.*

El cálculo de la bonificación está basado en el interés anual que el Banco de España determinaba para estas operaciones en el año 2006 (3,90%). En la tabla 40 se indica la reducción de los tiempos programados, para la fase 1, y los efectos sobre los intereses del crédito promotor, para cada alternativa.

Las alternativas con mayor capacidad de producción obtienen una mayor bonifica - ción al posibilitar una mayor reducción del tiempo de ejecución de la fase 1.

Es importante valorar que la compensación positiva se ve limitada, en este proyec - to, a un tiempo (11 semanas) y a una fase (fase1). Esto no suele ser lo habitual en este tipo de instalaciones, cuya vida suele extenderse lo más posible. Si el tiempo de vida

considerado hubiese sido más largo, la compensación hubiese sido mayor, lo que debe ser tenido en cuenta en otros estudios similares.

La bonificación actúa reduciendo (restando) la componente de OPEX y desplazan - do hacia abajo su curva y la del coste total, tal como se apuntaba en el Caso 1.

La tabla 45 y la figura 135 muestran que la opción Tanen sigue siendo la mejor (op ción 1).

La opción Kopfer está próxima a la Tanen en cuanto a coste total (opción 2); sin embargo, en base a los datos de la tabla, su distancia, en términos de coste total, se incrementa por su menor capacidad de producción (-150 m^3/ día con respecto a la Tanen).

Esta etapa pone en valor, para el caso en estudio, el parámetro "capacidad de producción" en la configuración del diseño de la alternativa.

Las alternativas Iberia y Cemprini son significativamente más caras. *La opción Cemprini continúa siendo la peor valorada.*

Tabla 45. **Etapa 3.2:** Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX y penalizaciones. (Se incorporan **compensaciones positivas**).

Resultado ranking alternativas	3	**1 Mejor**	**2**	**4 Peor**

Criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,89	100	99,97	99,86
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,80923832	100,7703948	100,3562132	99,40290406
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	80	95	130
downtime (horas) fases 1 y 2	7	-28	-13	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
(1) CAPEX**(€)**	730000	850000	805000	620000
(2) compensación downtime planificado fase 1 **(€)**	33873	-135492	- 62907	106458
(2´) compensación downtime planificado fase 2 **(€)**	0	0	0	0
(3) coste mantenimiento **(€)**	4800	3500	3700	6000
(4) Riesgo(RDC)**(€)** (* *Sin opciones A+B+C)*	407346,4	0	101836,6	509183
(5) **bonificación positiva(€)**	15154,71	37440	22820,41	5620,9
OPEX **(€)**: 2 + 2' + 3 + 4 - 5	430864,69	-169432	19809,19	616020,1
coste total (€): CAPEX + OPEX	**1160864,69**	**680568**	**824809,19**	**1236020,1**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1 (en €)				**555452,1**
Diferencia opción 2 – opción 1 (en €)				**144241,19**

Se confirman las dos hipótesis que surgieron en el Caso 1 asociadas a las siguientes situaciones:

1. La influencia de la compensación positiva en el trade-off LCC vs. proceso de decisión: *Coste Total* (€) = [*CAPEX + OPEX)*] – *(compensación positiva).*
2. El efecto sobre el OPEX y la curva de coste total al introducir conjuntamente compensaciones positiva y negativa a la hora de determinar el intervalo de LCC mínimo.

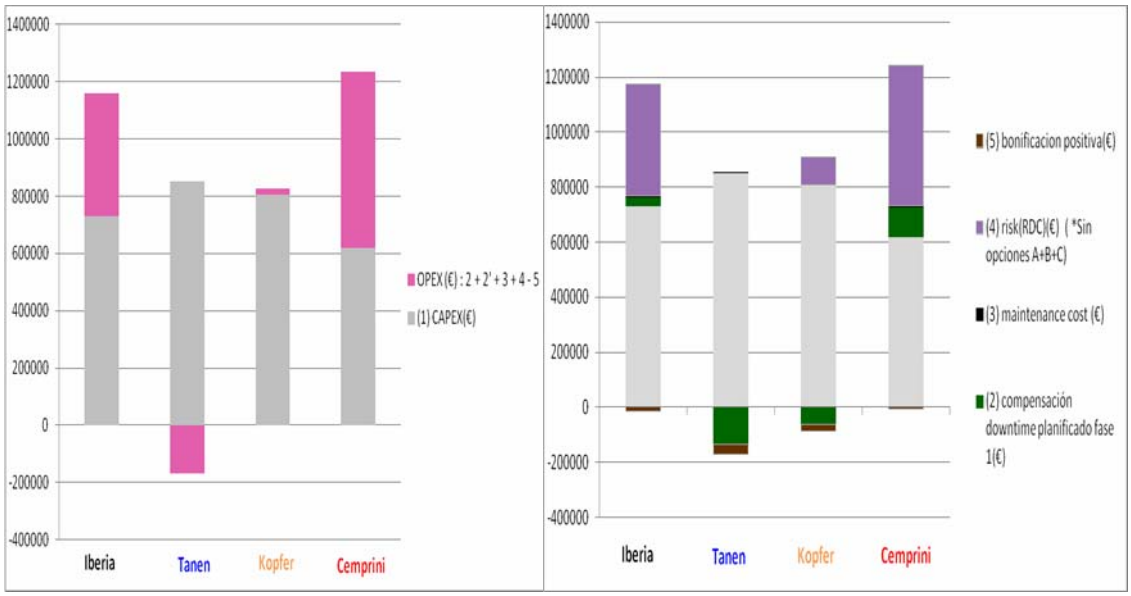


Figura 135: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. **Se consideran las bonificaciones.**

Etapa 4: *Incorporación de recompra y/o desmontaje de la instalación al proceso de decisión.*

Dado la naturaleza "desmontable" del subsistema, y con la finalidad de reducir los costes totales, se considera y negocia la posibilidad de recompra por parte del provee - dor, pactándose un porcentaje fijo, y otro variable, en función del estado final de la ins - talación.

En la tabla 46 se introducen los valores negociados para cada alternativa. La recompra de la instalación oscila entre el 50-60% del valor de la misma. Sólo la casa Cemprini rehusó la recompra de la instalación, por lo que se penaliza esta alternativa con el costo de su desmontaje y posterior montaje en otra ubicación (para el cálculo se han utilizado los costos de una operación muy similar efectuada por Cementos del Archipiélago, S.A. entre los puertos de Cartagena y Las Palmas de Gran Canaria, en el año 2.004).

El coste total resultante disminuye en los casos de la recompra y aumenta en el caso de desmontaje (tabla 47):

Tabla 46: Recompra y/o desmontaje. Valores negociados para cada alternativa.

Recompra/Desm.	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Precio según estado	50%	50%	60%	**No**
Recompra (€)	365000	425000	483000	0
Desmantelamiento(€)	0	0	0	36000

(*) Se pacta un 50% inicial, pudiéndose alcanzar hasta un 75%, según alternativa, si el estado es óptimo.

Tabla 47. **Etapa 4:** Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX, compensación negativa y positiva. (Se incorpora **recompra o desmantelamiento**)

Resultado ranking alternativas	3	1 Mejor	2	4 Peor
Criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,89	100	99,97	99,86
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,81	100	100	99,40
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	80	95	130
downtime (horas) fases 1 y 2	7	- 28	-13	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
(1) CAPEX **(€)**	730000	850000	805000	620000
(2) compensación downtime planificado fase 1 **(€)**	33873	-135492	- 62907	106458
(2´) compensación downtime planificado fase 2 **(€)**	0	0	0	0
(3) coste mantenimiento **(€)**	4800	3500	3700	6000
(4) Riesgo(RDC) **(€)** ***(*Sin opciones A + B + C)***	407346,4	0	101836,6	509183
(5) bonificación positiva**(€)**	15154,71	37440	22820,41	5620,9
OPEX **(€):** 2 + 2' + 3 + 4 - 5	430864,69	-169432	19809,19	616020,1
(6)Coste total (€): CAPEX + OPEX	**1160864,69**	**680568**	**824809,19**	**1236020,1**
(7) recompra **(€)**	365000	425000	483000	0
(8) coste desmantelamiento **(€)**	0	0	0	36000
Coste Total final (€): (6) - (7) + (8)	**795864,69**	**255568**	**341809,19**	**1272020,1**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1 (en €)				**1016452,1**
Diferencia opción 2 – opción 1 (en €)				**86241,19**

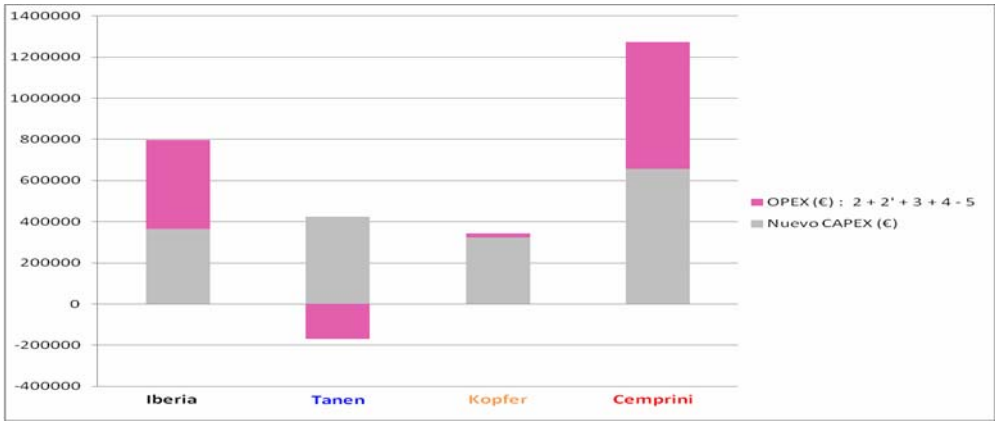


Figura 136: Detalles gráfico para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. **Se considera recompra o desmantelamiento.**

La tabla 47 y la figura 136 muestran que la opción Tanen sigue siendo la mejor.

La opción Kopfer (opción 2) reduce su distancia a la Tanen, en cuanto a coste total, dado que se ve favorecida por la negociación del "factor recompra".

La opción Cemprini continua siendo la peor valorada; incrementa su diferencia,

con respecto a la mejor opción (la de mayor CAPEX), por la falta de negociación en la recompra. La política comercial perjudica su candidatura.

Esta etapa pone en valor, para el caso en estudio, el parámetro "política comercial del proveedor" en la configuración del diseño de la alternativa.

Etapa 5: *Incorporación Opciones mejora preventivo/predictivo al proceso de decisión.*

Del análisis de la información obtenida en las diferentes etapas, se observa que las penalizaciones por compensación del downtime y riesgo tienen un peso importante en el coste total de cada alternativa (tablas 38 y 39). Por tanto, se consideran relevantes en el proceso de decisión para definir la configuración y el diseño de las mismas.

En la fase de estudio del CAPEX y el OPEX a través de los árboles de las figuras 129 y 130 se estableció que, dado la naturaleza del proyecto, la función mantenimiento necesita optimizar los niveles de prevención aplicables con objeto de optimizar la capacidad de producción disponible (mucho más crítica en la fase 2). La clave está en la minimización del downtime (factor de coste más significativo) y la maximización de la "disponibilidad contractual" debido a su influencia positiva y directa sobre el proyecto. Dado que el factor de utilización de la central es alto, el downtime es un factor dominante. Por tanto, se configura como variable crítica para las decisiones de gestión del mantenimiento y la planificación y control de la producción (reglas de prioridad para gestionar los cuellos de botella, estimación de los tiempos de producción, etc.).

Sin embargo, el problema de minimización del downtime es complejo debido a que depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capacidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambientales, entre otros). Por tanto, es importante la planificación coordinada del mantenimiento, y su soporte logístico, en la fase conceptual (preliminar) del diseño.

Factores como: la disponibilidad de piezas de repuestos; las habilidades, experiencia y formación del personal; y la calidad de los trabajos de mantenimiento, se consideran elementos que favorecen la reducción del riesgo.

Por la naturaleza del proyecto y las características del emplazamiento, se evalúan tres opciones encaminadas a mejorar el downtime del subsistema y el comportamiento al fallo (tabla 36):

(A) Stock de consumibles y elementos críticos. La cantidad varía según la alternativa considerada. Para su estimación y cálculo se analizaron los manuales de mantenimiento de todas las alternativas, escogiendo como referencia base el más amplio de los cuatro.

(B) Software de control de averías y mantenimiento (Predictivo). Para una gestión interna (rápida y planificada) y un control externo por parte del equipo técnico del suministrador.

(C) Servicio Técnico de formación. Impartido por personal técnico del proveedor. El objetivo es formar y dotar al personal de explotación en herramientas de gestión eficientes en todos los aspectos internos de la central (mantenimiento, reparación, aumento o disminución de producción, etc.). El periodo mínimo de formación será de dos meses.

La formación y la información de los trabajadores es básica para una efectiva y eficiente operatividad, de ahí que se contemple como opción (*La formación iría acompañada de una certificación del fabricante y parte de ella será sufragada por el fondo para la formación que la empresa ha de disponer anualmente por el trabajador (480 euros/año)*).

La tabla 36 recoge los costes, para cada alternativa, para las tres opciones y su efecto sobre el comportamiento al fallo. Los datos han sido suministrados por los proveedores de las distintas alternativas. La reducción en el número de fallos se

garantiza mediante contrato firmado entre las partes.

Esta etapa pone en valor, para la configuración del diseño de la alternativa, una política de la función mantenimiento basada en la prevención frente a la intervención (tabla 48):

Tabla 48. **Etapa 5:** Selección central en base al desempeño, CAPEX, OPEX, compensación negativa y positiva y recompra o desmantelamiento.

(Se incorporan **Opciones preventivo/predictivo: (A) + (B) + (C)**)

Resultado ranking alternativas	3	2	1 Mejor	4 Peor
Criterio	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Fiabilidad fase 1 (en %)	99,95	100	100	99,92
Fiabilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Disponibilidad fase 1 (en %)	99,81	100	100	99,40
Disponibilidad fase 2 (en %)	100	100	100	100
Horas totales de mantenimiento	115	80	95	130
downtime (horas) fases 1 y 2	7	-28	-13	22
downtime (horas) fase 2	0	0	0	0
opción kit (A) (€)	**6000**	**3000**	**3500**	**6000**
opción software (B) (€)	**1800**	**2100**	**1950**	**1500**
opción técnico en obra (C) (€)	**8500**	**12000**	**10000**	**9000**
(1) CAPEX + A + B+ C **(€)**	740414	867100	820450	636500
(2) compensación downtime planificado fase 1 **(en €)**	33873	- 135492	- 62907	106458
(2´) compensación downtime planificado fase 2 **(en €)**	0	0	0	0
(3) coste mantenimiento **(€)**	4800	3500	3700	6000
(4) Riesgo(RDC) (€) *(*Con opciones A + B + C)*	**203673,2**	**0**	**0**	**305509,8**
(5) bonificación positiva **(€)**	15154,71	37440	22820,41	5620,9
OPEX **(€)**: 2 + 2' + 3 + 4 - 5	227191,49	- 169432	- 82027,41	412346,9
(6)Coste total (€): CAPEX + OPEX	**967605,49**	**697668**	**738422,59**	**1048846,9**
(7) recompra **(€)**	365000	425000	483000	0
(8) coste desmantelamiento **(€)**	0	0	0	36000
Coste Total final (€): (6) - (7) + (8)	**602605,49**	**272668**	**255422,59**	**1084846,9**
Diferencia ranking puesto 4 – puesto 1 (en €)				**829424,31**
Diferencia opción 2 – opción 1 (en €)				**17245,41**
STM + C = Kopfer				

(*) Se sumará al Coste Total final de todas las alternativas la cantidad de 4570,042 €.

La incorporación del paquete de opciones incrementa la componente de CAPEX y minora la componente RDC; esto pone en valor que una estrategia orientada hacia la potenciación de los inductores de ingresos genera un efecto inducido mayor sobre la reducción de los conductores de costes (figura 137). Igualmente, muestra la importancia de la función mantenimiento como función de negocio.

La tabla 48 y la figura 137 muestran que la opción Kopfer (opción 1), en términos de coste total final, es mejor ahora que la Tanen (opción 2), por el efecto de incorpo - ración del paquete de opciones sobre la componente RDC (“propiedades emergentes”).

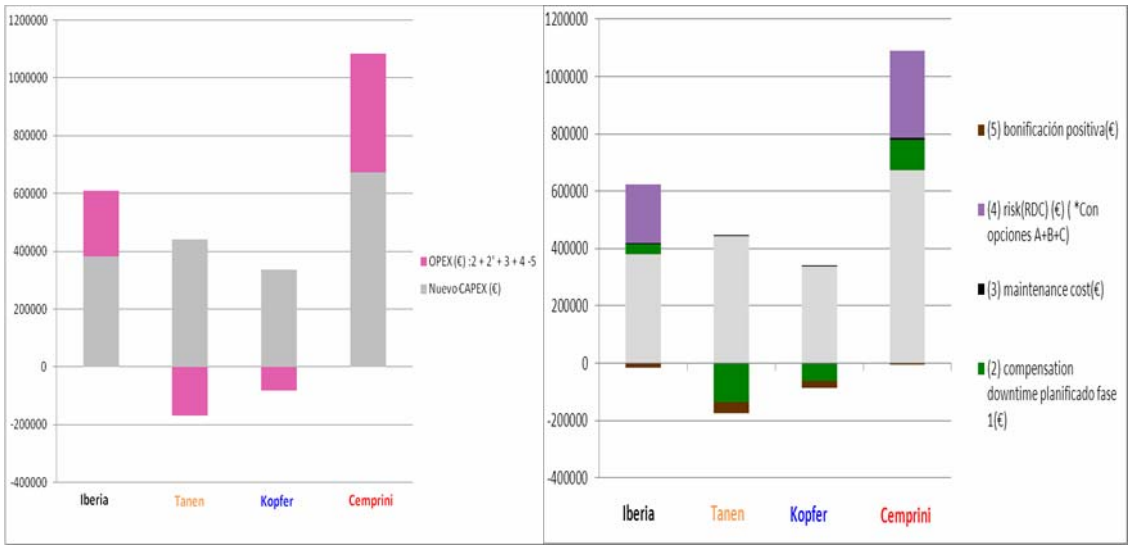


Figura 137: Detalles gráficos para el "análisis técnico relativo" en el proceso de decisión para el diseño y selección del subsistema en base al desempeño y trade – off CAPEX vs. OPEX. Se considera **Opciones preventivo/predictivo.**

El resultado anterior muestra que un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final (figura 138); también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de precisión .(Goldratt,E.M,1990)

En esta etapa se observa que un incremento del CAPEX, por la incorporación de la componente de opciones, mejora la componente de coste total de la opción Kopfer, pero no aporta ningún valor a la Tanen. Se pueden extraer las siguientes dos conclusiones:

- Para la opción Tanen, teóricamente, puede prescindir del paquete de opciones.
- La opción Kopfer sería la STM+C:

STM+C (a este nivel de etapas del proceso de decisión) = Kopfer

Es la que mejor coste total final presenta con un CAPEX inferior a la Tanen (descontado incluso el paquete de opciones).

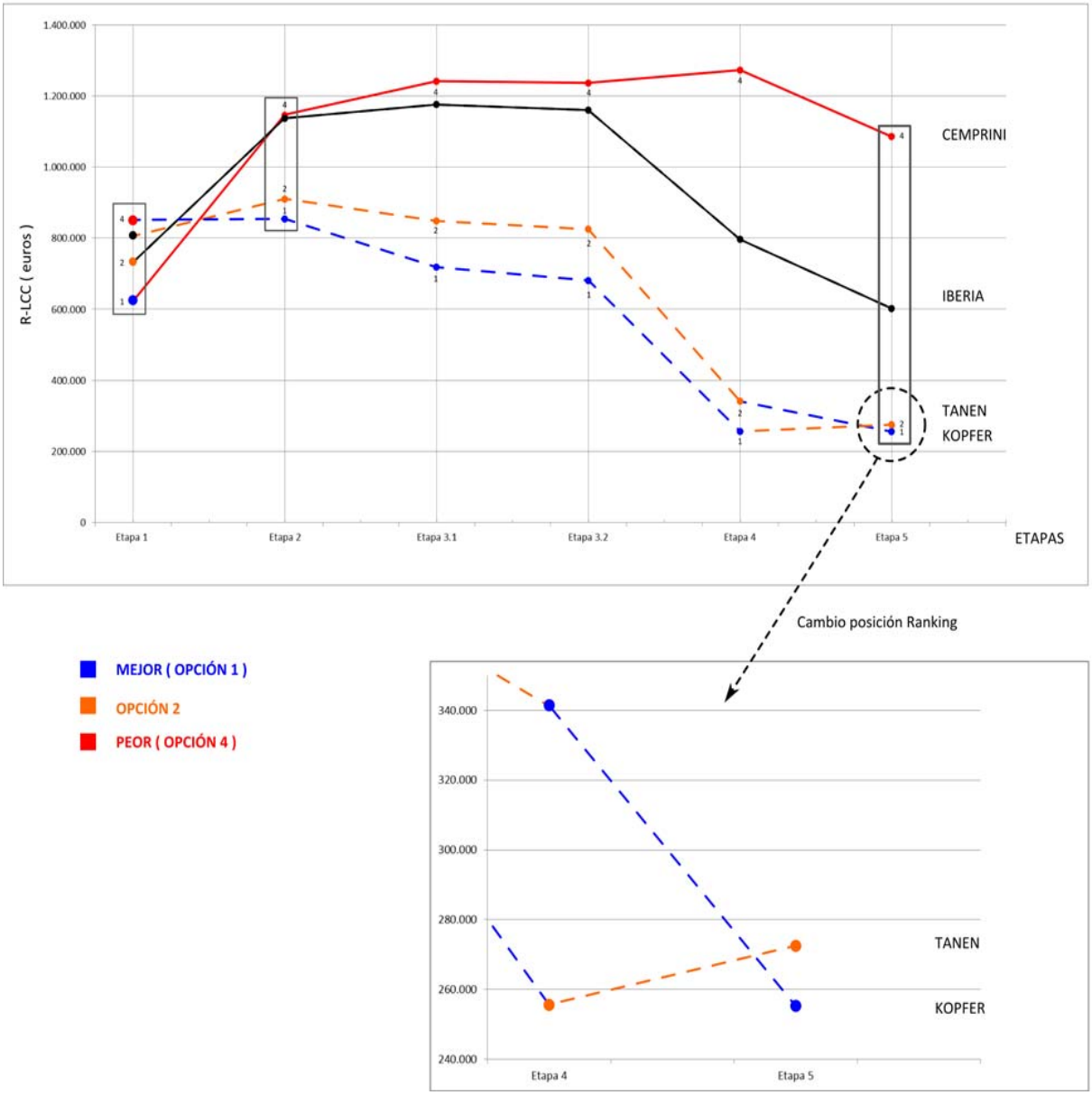
La opción Cemprini continua siendo la peor valorada incrementando su diferencia con respecto a la mejor opción (de mayor CAPEX que la Cemprini en la etapa 1).

La tabla 49 muestra la evolución de cada alternativa en base a trade –off soportados por el refinamiento multietapa, en términos funcionales, de la componente de coste total y el performance.

Tabla 49: Resumen Proceso de decisión multietapa. Evolución del R-LCC para cada alternativa.

Alternativas/Etapas	***Alternativas***			
Proceso decisión:	**Iberia**	**Tanen**	**Kopfer**	**Cemprini**
Etapa 1 (Desempeño + CAPEX)	**730.000**	**850.000**	**805.000**	**620.000**
Etapa 2 (+ OPEX $_{básico}$)	**1.142.146,4**	**853.500**	**910.536,6**	**1.135.183**
Etapa 3.1 (+ compensaciones negativas)	**1.176.019,4**	**718.008**	**847.629,6**	**1.241.641**
Etapa 3.2 (+ compensaciones positivas)	**1.160.864,69**	**680.568**	**824.809,19**	**1.236.020,1**
Etapa 4 (+ Recompra o desmantelamiento)	**795.864,69**	**255.568**	**341.809,19**	**1.272.020,1**
Etapa 5 (+ Opciones Preventivo/predictivo)	**602.605,49**	**272.668**	**255422,59**	**1.084.846,9**

La figura 138 muestra el gráfico de tendencia del proceso deductivo para el diseño, configuración y selección de la STM+C del subsistema:



(*) R- LCC (Risk based Life Cycle Cost): Coste del Ciclo de Vida basado en el Riesgo.

Figura 138: El camino del Proceso de decisión multietapa. Comparación y análisis relativo de alternativas en base al R-LCC.

Se observa que un refinamiento de los datos en el proceso multietapa de decisión mejora el proceso deductivo utilizado para el diseño, configuración y selección de la STM+C.

CONCLUSIONES.

En la fase de diseño de un sistema es importante examinar las diferentes situaciones de fabricación y las impuestas por el mercado con objeto de configurar y seleccionar soluciones robustas y confiables que den respuestas efectivas y eficientes a la gestión de operaciones:

$$\left\{\begin{array}{c}\text{Alineamiento estratégico}\\ \text{para}\\ \text{la configuración del diseño}\end{array}\right\} = \text{Cliente} \rightleftarrows \text{contratista(Proveedor interno)} \rightleftarrows \text{mercado(Proveedor externo)}$$

La evolución de las etapas del proceso de decisión establece un “proceso dinámico de búsqueda” de la solución que obliga a una “calibración dinámica” de las diferentes alternativas para dar una respuesta eficiente en cada momento.

De acuerdo con los resultados obtenidos, y en un contexto competitivo, es clave que el analista (contratista) disponga de una metodología que le permita investigar e innovar sobre diferentes alternativas de diseño para seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre los requerimientos asociados a la “componente de valor” y la “componente de coste total”, sobre el ciclo de vida establecido.

El objetivo principal debería estar centrado en reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos. Tanto la instalación (“hard”), como los procesos de operación y mantenimiento (“soft”) vinculados a la solución adoptada, deberían estar sujetos a un proceso de optimización con objeto de minimizar las “pérdidas” y maximizar el ROFA.

Una forma de controlar la eficiencia, es a través de la utilización combinada de datos de mantenimiento con datos financieros, lo que contribuye a identificar y resolver problemas que afectan negativamente al ROFA.

En este tercer caso, se aplica el proceso de decisión desarrollado en este trabajo de tesis al diseño y la selección, de forma estructurada y base científica**,** de Soluciones Técnicas y de Operación & Mantenimiento Coste-efectivas (STM+C) del subsistema crítico “central hormigonera”.

La metodología está basada sobre la evolución gradual de los detalles del diseño y la componente de coste total, la utilización de técnicas semicuantitativas y la gestión activa de la información del equipo nuclear de proyecto (gerente*(agente responsable)* + técnicos de operación y mantenimiento*(expertos)* + analista).

El proceso de decisión está orientado hacia el ciclo de vida del sistema en la fase de diseño en base al interés y objetivos del cliente; está estructurado sobre una metodología de toma de decisiones multietapa.

Destacan, como conclusiones principales del estudio:

- La importancia de realizar un análisis riguroso y completo del sistema técnico a di – señar para determinar y conocer los principios de funcionamiento propios (genotipo) e identificar las categorías y la estructura de costes significativos con objeto de que la *STM (Solución Técnica y de O&M)* seleccionada cumpla con las funciones, a nivel técnico y económico, que se le exige a largo del ciclo de vida.
- Un enfoque centrado en el ciclo de vida global del sistema (ingeniería concurrente) contribuye a seleccionar la mejor solución, en la fase de diseño y adquisición, desde la óptica de la sostenibilidad (económica , funcional y social).
- Las alternativas de menor CAPEX no son las de menor LCC total (figuras 132 a la 137).
- La importancia del LCCA para la toma de decisiones en el proceso de evaluación de diferentes alternativas que compiten entre si.

- El Coste de Adquisición de un activo representa una pequeña parte del coste total acumulado en el tiempo de vida establecido para el mismo. Se demuestra que es un criterio erróneo de selección (figuras 133 a 137).
- Los efectos de adoptar una solución deficiente ("patologías de diseño") normalmen - te emergen en la fase de utilización, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión.
- Los Costes de Sostenimiento/Propiedad de un activo/sistema tienen un peso mayor que el precio de compra/adquisición.
- Las penalizaciones por compensación del downtime, planificado y no planificado (riesgo), tienen un peso importante en el coste total de cada alternativa. Representan un criterio relevante de decisión para definir los atributos de las mismas. Contribuyen, de forma importante, a la determinación de los candidatos a actuar como variables de decisión en el proceso MCDM.
- Es muy importante traducir el downtime (o la indisponibilidad) en términos de cos - te; se trata de un aspecto clave para garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo (sostenibilidad económica) a la hora de la selección de la *STM+C*.
- Las ecuaciones de compensación ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el *modelo de toma de decisiones basado en el riesgo*. Obligan al contratista a valorar, a la hora del diseño y configuración de la solución, las tasas de compensación.
- Los costes relevantes suelen ser costes ocultos. Por tanto , es necesario el uso de herramientas que ayuden a:
    - una determinación rigurosa y precisa de las estructuras de costes.
    - descubrir "propiedades emergentes", sinergias, diferencias competiti - vas, inductores de ingresos e inductores de costes.
- La productividad del subsistema ($p < 1$) se ve afectada por las pérdidas vinculadas a los problemas técnicos que puedan aparecer, en la fase de utilización, en los procesos de operación y mantenimiento. Por tanto, la "productividad real neta" dependerá de la eficiencia de la instalación *(η: Fase de diseño)* y la efectividad de los procesos de O&M (Fase de operación).
- Las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un activo (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo, y por tanto, sobre el factor de sostenibilidad económica y funcional de la inversión. Sin embargo, la práctica habitual en las decisiones de inversión es tomar como base el precio de compra, lo cual se ha demostrado que representa un criterio equivocado.
- Es necesario un cambio cultural para introducir un modelo que enfatice los proce - sos de decisión basados en el riesgo, las consecuencias y los factores asociados a la sostenibilidad (ambiental, social, económica).
- El salto cualitativo que debe perseguir la función mantenimiento para dar respuesta a las exigencias continuas establecidas por las diferentes dinámicas del mercado es su evolución del actual enfoque basado en la intervención a uno nuevo centrado en la prevención. Es necesario intensificar el concepto de "mantenimiento planificado" y "mantenimiento efectivo" (Conde Collado, J., et al., 2003) con objeto de reducir los costes potenciales asociados al downtime.
- La razón fundamental del mantenimiento está relacionada con la reducción de las consecuencias del fallo. Por tanto, los aspectos económicos han de jugar un papel im - portante en la planificación de esta función, considerándose los costes asociados a la pérdida de producción como la consecuencia dominante.
- Para la optimización de la función resulta fundamental determinar con rigor la rela -

ción gasto en mantenimiento vs. coste de mantenimiento (pérdidas de producción, costes de riesgo, etc.) para poder establecer con precisión los trade –off.

- Las paradas planificadas están en la frontera entre la ingeniería y la fase de planificación de la O&M. Por tanto, dan la posibilidad de reducir las pérdidas asociadas a las mismas a través de una acertada definición de la estrategia de inversión y de O&M.
- Una estrategia de inversión bien orientada en "inductores de ingresos" genera un efecto mayor sobre la reducción de costes que una centrada , exclusivamente, en la reducción de costes. Esta última estrategia podría, incluso, poner en riesgo la sostenibilidad de la inversión.
- En la práctica es necesario un cambio cultural para:
    - aceptar un mayor coste de adquisición en aras a conseguir unos mejores resultados a futuro; esto es, un cambio de "mentalidad de corto plazo" por otra de medio y/o largo plazo.
    - La formación de equipos multidisciplinares para el diseño y selección de la STM donde intervenga personal que gestiona la fase de operación.
- La información sólo se puede deducir de la utilización de un proceso de decisión. Un cambio en el proceso de decisión no sólo implica un cambio en el resultado final (figura 138); también implica un cambio en la naturaleza de los datos requeridos y en su nivel de exactitud.
- Las garantías de desempeño y las ecuaciones de compensación representan una buena forma de cuantificar económicamente la efectividad total de un sistema; permiten imputar la responsabilidad sobre los costes diferidos.
- Para el diseño eficiente de un sistema técnico es primordial su contextualización para una precisa y correcta configuración y valoración.
- Existe muy poco conocimiento y falta experiencia sobre cómo estimar los costes de operación y mantenimiento.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

CONCLUSIONES.

El alto nivel de competitividad impuesto por las dinámicas y complejidad de los mercados actuales exige una elevada capacidad de respuesta. Por este motivo, las compañías encuentran severas dificultades a la hora de diseñar, rediseñar o rees - tructurar sus plantas productivas. En este contexto**,** es muy importante una gestión más científica, tanto a nivel estratégico, como táctico, y operativo, que permita el "reemplazo" de decisiones soportadas por criterios subjetivos por decisiones objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos.

Los efectos de adoptar una solución deficiente ("patologías de diseño") normal - mente emergen en la fase de utilización, lo cual podría poner en riesgo la rentabilidad y sostenibilidad de la inversión. Por tanto, los procesos de toma de decisiones, tanto en la fase de inversión como de operación, son extremadamente importantes debido a su impacto tanto sobre la sostenibilidad económica como funcional de las inversiones.

En respuesta a la situación planteada, en este trabajo de tesis se definen y dise - ñan, para dar apoyo a los procesos de decisión en la Fase de Inversión y de Utiliza - ción, unos "modelos integradores" para los procesos de decisión centrados en dos objetivos básicos:

A. La *mejora de la eficiencia*, a través del diseño con rigor de Soluciones Técnicas y de O&M Coste - efectivas (STM+C). Se ha diseñado y desarrollado una herra – mienta, para apoyar al analista de sistemas, con dos utilidades básicas:

- la definición gradual de "arriba a bajo" (diseño descendente o top-down) de los detalles del diseño en base a la investigación, comparación e innovación de diferen - tes alternativas de diseño;
- la selección de la configuración STM+C óptima, y su gama de alternativas, en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y la componente de coste total, para el ciclo de vida considerado y las necesidades y objetivos del cliente.

B. La *mejora de la efectividad y productividad real neta,* a través del Control y la Gestión dinámica de la configuración. Se ha diseñado una metodología que permite la posibilidad de realizar una gestión más científica, tanto a nivel estratégico, como táctico, y operativo, lo que posibilita el "reemplazo" de decisiones soportadas por criterios subjetivos por decisiones objetivas basadas en la aplicación de métodos formales y científicos, tales como análisis de sistema y la construcción de modelos matemáticos.

Las contribuciones principales de este trabajo de tesis son:

- La identificación de los factores directores para la definición y diseño de los mo - delos para la gestión del mantenimiento sobre una base económica, la propuesta de un nuevo modelo general de mantenimiento para el aseguramiento del estado, y el desarrollo de los pilares claves del marco de referencia para alcanzar los máximos niveles de eficiencia y efectividad de los activos.
- El diseño y desarrollo de un proceso de decisión (modelo de toma de decisiones basado en el riesgo) para el diseño, de forma estructurada y base científica, de alter - nativas STM+C de sistemas tecnológicos complejos cuando los trade - off han de ser realizados sobre la base del desempeño (performance) vs. coste total. Las "garantías del desempeño en el funcionamiento (garantías de performance)" son incorporadas al proceso de decisión (en el nivel 1) y de selección de la mejor alternativa y usadas para cuantificar económicamente la efectividad total de una alternativa.

Para favorecer la "convergencia fuerte"hacia la configuración óptima, el proceso es iterativo para facilitar una apropiada realimentación para el "refinamiento top-down"de los detalles de diseño a nivel de sistema, subsistema y componentes.

• La introducción, como elementos claves del proceso de toma de decisiones para la selección óptima de STM+C con objeto de garantizar un nivel de competitividad sostenible en el tiempo, de: el análisis de las garantías de desempeño, para cada alternativa; la construcción de las ecuaciones de compensación (penalizaciones & bonificaciones); el análisis de escalabilidad (para adaptar la evolución del sistema a las disponibilidades presupuestarias y las demandas dinámicas del mercado); y el R-LLCA (Análisis LCC basado en el análisis de riesgos).

• La definición y diseño del proceso de decisión, y de la plataforma científico-técnica, para el control y la gestión dinámica de la O&M. Se propone un sistema de información para mejorar, de forma estructurada y base científica, el grado de com - petencia, en la fase de operación, de la STM+C seleccionada mediante la gestión de su configuración o, su reestructuración/rediseño ("nueva configuración adaptada").

• El establecimiento de las directrices, no un análisis completo, para el desarrollo de una herramienta que brinde una información organizada del funcionamiento y ofrezca la oportunidad de controlar los efectos sobre las actuaciones realizadas para la gestión y control dinámico del ciclo de vida del sistema.

Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis muestran, como principales ventajas de los modelos desarrollados, las siguientes:

• Ofrecen un punto de vista práctico orientado hacia la realidad del sistema y centrado en el usuario final, la mejora y la toma de decisiones.

• Brindan un análisis riguroso y completo del sistema técnico a diseñar para determinar y conocer los principios de funcionamiento e identificar las categorías y la estructura de costes significativos.

• Permiten el diseño y planificación, con un enfoque orientado al ciclo de vida (diseño concurrente), de las inversiones en sistemas técnicos complejos (nivel 1).

• Ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos económicos diferidos), el proceso de toma de decisiones.

• Minimizan los impactos sobre el cliente (usuario de una solución) mediante la reducción de los efectos diferidos (económicos, accidentes, paradas no programadas) que emergen en la fase de operación vinculados a errores, tanto de diseño como de toma de decisiones, en la fase de adquisición. Transfieren los costes/beneficios a la "Parte" responsable de su diseño y elección.

• Ayudan a comprender y gestionar los procesos internos asociados a la función mantenimiento en sintonía con los objetivos del negocio. Por tanto, dan la posibilidad de optimizar la explotación y el mantenimiento de equipos bajo criterios de fiabilidad, disponibilidad, seguridad pública y medioambiental, costes del ciclo de vida, criterios de explotación y plan de negocio.

• Dan una visión del mantenimiento más amplia, no sólo la del punto de vista del gasto que supone a nivel contable, sino también, por los riesgos que minimiza y los beneficios ocultos que implica su correcta planificación y ejecución.

• Contribuyen a reducir los niveles de incertidumbre.

El análisis de los casos, en el capítulo de aplicaciones, provee una descripción detallada sobre la implementación de la metodología, ilustra los resultados y aporta un conjunto de conclusiones para cada caso.

Otras conclusiones, de carácter general, de resultados obtenidos en este trabajo, son:

- Los "óptimos globales"no son estáticos. La alteración/modificación de las condiciones externas/internas exige que el espacio solución evolucione en sintonía, lo que requiere un proceso dinámico de búsqueda de óptimos.
- Los casos prácticos analizados muestran, entre otras conclusiones:

a. La importancia del R - LCCA para la toma de decisiones en el proceso de evaluación y selección de diferentes alternativas que compiten entre si.

b. La necesidad de gestionar apropiadamente la incertidumbre y la considera - ción de sus efectos.

- En un planteamiento orientado hacia el ciclo de vida del sistema (ingeniería con – currente), las decisiones tomadas en las fases iniciales de vida de un activo (Nivel 1) tienen el mayor impacto potencial sobre el coste de la vida total del mismo. Sin embargo, la práctica habitual en las decisiones de inversión, es tomar como base el precio de compra, lo cual se demuestra que constituye un criterio erróneo de selección en el proceso de decisión.
- El análisis LCC debe predecir/estimar los costes, el tiempo de operación y las actividades de mantenimiento a realizar para el ciclo de vida proyectado, por lo que dá la posibilidad, también, de preparar especificaciones optimizadas para los equipos y sistemas.
- Los costes relevantes suelen ser costes ocultos. Ello exige una disciplina de mo - nitorización y uso de técnicas de análisis para identificar **diferencias y propiedades emergentes** fuentes de ventajas competitivas. Ponen de manifiesto la necesidad del uso de herramientas para el análisis que ayuden, tanto en la fase de diseño como de utilización del sistema, a:
    - una determinación rigurosa y precisa de los perfiles de operción y de costes.
    - descubrir "propiedades emergentes", sinergias, diferencias competitivas, inductores de ingresos e inductores de costes.
- El tiempo que una unidad de producción no está operativa debido a tareas de mantenimiento (downtime) es una variable dominante cuando el factor de utilización de la unidad de producción es alto. Por tanto, es un factor importante para las decisiones de gestión del mantenimiento y para la planificación y control de la producción (reglas de prioridad para gestionar los cuellos de botella, estimación de los tiempos de producción, etc.).
- El objetivo de cualquier estrategia de mantenimiento debe estar encaminado a reducir al mínimo el conjunto de costes indirectos. Por tanto, es importante la selección y la correcta aplicación de técnicas y métodos de gestión del mantenimiento para obtener una mayor rentabilidad del capital invertido mediante la mejora de la disponibilidad y fiabilidad de los activos fijos y el activo circulante.
- La función mantenimiento debe dar respuesta en los tres niveles que garantiza la competitividad: en el nivel inicial de la inversión, en los costes operativos y a nivel de facturación.
- Una estrategia de inversión bien orientada en "inductores de ingresos" genera un efecto mayor sobre la reducción de costes que una centrada, exclusivamente, en la reducción de costes. Esta última estrategia puede, incluso, poner en riesgo la sosteni - bilidad de la inversión.
- En la práctica, es necesario un cambio cultural para aceptar un mayor coste de adquisición en aras a conseguir unos mejores resultados a futuro; esto es, un cambio de "mentalidad de corto plazo" por otra de medio y/o largo plazo.

LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.

- Una de las líneas abiertas estaría relacionada con la "profundización" en la "ges - tión científica" del mantenimiento a nivel estratégico, táctico y operativo. Estaría orientada al desarrollo de técnicas de ayuda y apoyo en la toma de decisiones a los responsables de mantenimiento (planificador, ingeniero de mantenimiento y gerente) con un enfoque económico. El objetivo sería reducir juicios subjetivos por análisis cuantitativos basados en la aplicación de métodos formales y científicos. En esta línea estaría:

- La búsqueda de instrumentos que permitan conectar las actuaciones de mantenimiento con la repercusión económica que estas actuaciones tienen sobre la rentabilidad de la empresa, y consecuentemente, sobre su cuenta de resultados.
- Desarrollo de técnicas que estén enfocadas a la optimización de la gestión del mantenimiento y que estén centradas en el usuario final.
- Investigación para que los modelos matemáticos existentes contemplen las hipótesis reales de producción y mantenimiento. Igualmente, es necesario su adaptación y ampliación para dar respuesta a otras demandas a nivel organizativo, técnico, financiero.
- Unificación de los modelos existentes y una revisión crítica de su aplicabilidad, más que construir nuevos modelos. A pesar de que existen múltiples modelos, existe poco conocimiento sobre su aplicabilidad.
- Búsqueda de técnicas en el campo de OR/MS que puedan ser de aplicación al apoyo y la toma de decisiones en la gestión del mantenimiento.
- Desarrollo de procedimientos rigurosos/fiables de recogida y procesamiento de datos en tiempo real.
- Desarrollo de herramientas que permitan la Gestión del Mantenimiento con cri - terios o base económica.

- Búsqueda de "métodos semicuantitativo" que permitan la identificación, diag - nóstico y estructuración de un problema de operación/mantenimiento de forma adecuada y la construcción de modelos de forma consistente.
- Desarrollo de metodologías científico - técnicas que permitan potenciar el mantenimiento predictivo para el aseguramiento del estado.
- Determinación de "trazadores", cluster, y sus rangos de variación, para diagnós - tico de malfuncionamiento.
- Búsqueda de métodos cualitativos, y/o cuantitativos, de evaluación dinámica de la degradación en el estado de los equipos y sistemas por medio del seguimiento de su vida, condiciones de contorno y estrés o solicitaciones realizadas más allá de su comportamiento normal. Estos métodos han de permitir la prognosis de la evolución temporal del fenómeno de degradación y la vida remanente.
- Desarrollo de un Sistema Integrado de Información que permita un seguimiento integral, y en tiempo real, a nivel técnico y económico.
- Definición de una estructura funcional, a nivel organizativo, que garantice la fiabilidad de los datos y la implementación y explotación eficaz y eficiente de los equipos y sistemas.
- Desarrollo de herramientas centradas en el usuario final.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- ***General.***

- Agnihothri, S.R. and Karmarkar, U.S.,1987. *Performance Evaluation of Service Territo - ries.* Working Paper, W.E. Simon School, University of Rochester (Rochester, N.Y.).
- Ahlmann, H., 2002. *From traditional practice to the new understanding: the significan - ce of Life Cycle Profit concept in the management of industrial enterprises*. IFRIMmmm Conference, Vaxjo Sweden, 6-7 May 2002.
- Alcaly, J.A., and Buffa, E.S., 1973. *A proposal for a general model of a production system.* International Journal of Production Research 11, pp. 303-321.
- Al-Najjar, B. and Alsyouf, I., 2004. *Enhancing a company´s profitability and competiti - veness using integrated vibration- based maintenance: a case study.* European Journal of Operational Research, Vol. 157, Nº 3, pp. 643-657.
- Al-Jibouri, S. & Ogink, 2009. *Proposed model for Integrating RAMS Method in the De - sign Process in Construction.* Architectural Engineering and Design Management, pp. 179-192.
- Amoako-Gyampah, K. and Meredith, J.R., 1989. *The Operations Management Research Agenda: An Update.* Journal of Operations Management, Vol. 8, pp. 250-262.
- Anderson, B. and Pettersen, P.G., 1996. *The Benchmarking Handbook: Step by Step Intructions.* Chapman & Hall, N.Y.
- Andijani, A. and Duffuaa, S., 2002. *Critical evaluation of simulation studies in mainte - nance.* Production Planning and Control, Vol. 13, No. 4, pp. 336-41.
- Anthony, R.N., 1965. *Planning and Control Systems: A Framework for Analysis.* Har - vard University Press, Cambridge (Ma).
- Armitage, W. and Jardine, A.K.S., 1968. *Maintenance Performance: A decision problem.* International Journal of Production Research, Vol. 6, pp. 15-22.
- Aptitudexchange Glossary. http:/www. Aptitudexchange.com.
- Armstrong, T.I., 1987. *World of Plant Maintenance Management.* APICS Conference Proceedings, pp. 116-119.
- Aronson, B.R., 2002. *What to measure for proper maintenance.* Manufacturing Engi - neering, Vol. 129, Nº 4, pp. 71-76.
- Arts, R.H.P.M., Knapp, G.M.J. and Lawrence, M., 1998. *Some aspects of measuring maintenance performance in the process industry.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 4, Nº 1, pp. 6-11.
- Ascher, H. and Feingold, H., 1984. *Repairable Systems Reliability.* Marcel Dekker, NY.
- AEM, Asociación Española de Mantenimiento, 2000. *El mantenimiento en España (1 edn.).* Asociación Española de Mantenimiento, (sin ISBN). Barcelona.
- AEM, Asociación Española de Mantenimiento, 2005. *El mantenimiento en España (1 edn.).* Asociación Española de Mantenimiento (sin ISBN). Barcelona.
- Baker, K., 1974. *Introduction to Sequencing and Scheduling.* Wiley, New York.
- Bahill, A. and Dean, F., 2009. *What is System Engineering? A consensus of Senior Sys - tems Engineers.* Retrieved February 4.
- Balas, E., 1988. *The Prize Collecting Travelling Salesman Problem.*Working Paper, Graduate School of Industrial Administration, Carnegie Mellon (Pittsburgh, Pa).
- Baldin, A., 1979.*Condition Based Management: A Powerful Tool for Modern Plant Ma - nagement.* Terotechnica, Vol. 1, pp. 119-129.
- Bandi, R.K., Vaishnavi, V.K. and Turk, D.E., 2003. *Predicting maintenance perfor - rmance using object-oriented design oriented metrics.* IEEE Transactions of Software Engineering, Vol.29, Nº1, pp. 77- 87.
- Bardey, D., Riane, F., Artiba, A. and Eeckhoudt, L., 2005.*To maintain or not to maintain? What should a risk-averse decision maker do?* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 11, No. 2, pp. 115-20.

- Barlow, R.E., Proschan, F., and Hunter, I.C., 1967. *Mathematical Theory of Reliability.* Wilwey, New York.
- Barlow, R.E., Proschan, F., 1975. *Statistical Theory of Reliability and Life Testing.* Holt, Rinehart and Winston. New York.
- Barrat, M., 2002. *Risk Based Maintenance.* MB02017. http: // www. Aptitudex chan - ge.com.
- Barrat, M., 2004. *Maintenance Strategy Review (MSR) Methods.* SKF Reliability Sys - tems. MB 03306.
- Baskett, F., Chandy, K.M., Munz, R.R., and Palacios, F.G., 1975. *Open, Closed, and Mixed Network of Queues with different Classes of Customers.* Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 22, pp. 248-260.
- Basta, N., 1985. *Computerized Maintenance Management Offers Dividents for CPI Firms.* Chemical Engineering, Vol. 92, June, pp. 14-17.
- Basta, N., 1988. *Managers Tackle Maintenance Problems.* Chemical Engineering, Vol. 12, December, pp. 30-33.
- Bauters, W. and Bevers, B., 1990. *Maintenance Performance Reporting tool Voor een Chemisch Bedrijf.* Masters Thesis, Industrieel Beleid-KuLeuven.
- Beasley, J.E., 1984. *Fixed Routes.* Journal of the Operation of Research Society, Vol. 35, pp. 49-55.
- Bechtel, W. and Richardson, R. C., 1993. *Discovering complexity: Decomposition and localization as strategies in scientific research.* Princeton: Princeton University Press.
- Ben-Daya, M. y Duffuaa, S.O., 1995. *Maintenance and quality: the missing link.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.1, No.1, pp. 20-26.
- Ben – Daya, M., Duffuaa, S.O., Raouf, A., 2000. *Maintenance, Modeling and Optimi - zation.* Kluwer Academic Publiser, Massachussets.
- Bertsimas, D. and Van Ryzin, G., 1989. *The Dynamic Traveling Repairman Problems.* Working Paper, A.P., Sloan School of Management, MIT (Boston, Ma).
- Blackstone, J.H., Phillips, D.T., and Hogg, G.L., 1982. *A State of the Art Survey of Dispatching Rules for Manufacturing Job Shop Operations.* International Journal of Production Research Vol.20, pp. 27- 45.
- Blanchard, B.S., & Fabrycky, W, 1990. *Systems Engineering and Analysis*. Prentice Hall International, London.
- Blegen, H.M., and Nylehn, B., 1968.*Organizing the maintenance function: An analyti - cal approach.* International Journal of Production Research Vol.6, pp. 22-32.
- Bodin, L., Golden, B., Assad, A., and Ball, M., 1983. *Routing and Scheduling of Vehi - cles and Crews: the State of the Art.* Computers and Operations Research, Vol.10, pp. 63-211.
- Borda Elejabarrieta, José Mª, 2000. *Evolución en la problemática del mantenimiento y cambios necesarios en los sistemas de gestión.* Revista Dyna, pp. 17-22, enero- febrero.
- Bosch, K. & Jensen, U., 1983. *Maintenance models: a survey. Parts 1& 2* .OR Spektrum, 5, 105-118, 129-148 (Germany).
- Bratley, P., Florian, M. and Robillard, P., 1975. *Scheduling with Earliest Start and Due Date Constraints on Multiple Machines.* Naval Research Logistic Quarterly, Vol. 22, pp. 165-173.
- Brazenor, R.G., 1984. *The "M" in Production is still Silent.* APICS Conference Procee - ding, pp. 46-50.
- Breemer, J.J.A., 2009. *RAMS and LCC in the design process of infrastructural construc- truction projects: an implementation case.*
- Brown, J., 1984. *The Preventive Maintenance Planning Guide.* Plant Engineeering, Vol.38, No.6, pp.151-155, March.
- Buttery, L.M., 1978. *New Survey of US Maintenance Costs.* Hydrocarbon Processing, Vol.58, pp. 85-90.

- Campbell, D. T., 1974. *Downward Causation.* En Ayala, F. J. & Dobzhansky, T. (eds.) Hierarchically Organised Biological Systems. Studies in the Philosophy of Biology, Berkeley, Los Angeles: University of California Press, 179-186.
- Cariani, P., 1989. *On the design of devices with emergent semantic functions*. PhD Thesis, State University of New York at Binghamton.
- Cariani P., 1991. *Emergence and artificial life*. In: Artificial life II. Langton CG, Taylor C, Farmer JD, Rasmussen S. eds. Sante Fe Institute studies in the sciences of complexity, vol X, Reading, MA: Addison-Wesley, pp. 775-798.
- Cattrysse, D. and Van Wassenhove, L., 1989. *A Survey for the Generalized Assignment Problem.* Working Paper 89-23, Industrieel Beleid - KULeuven (Leuven).
- Chanin, M.N., 1979. *Maintenance Organization and Maintenance Models: Bridging the Implementation Gap.* Annual Conference Instrument Society of America.
- Charray, Carlos, 2000. *Mantenimiento predictivo: una técnica que reduce o elimina ave -rías inesperadas.* Revista Dyna, pp. 28-34, enero- febrero.
- Chestnut, Harold, 1965. *Systems Engineering Tools.*
- Cho, D.I. & Parlar, M., 1991. *A survey a maintenance models for multi- unit systems.* European Journal of the Operational Research, 51.
- Christer, A.H. and Goodboy, W., 1987c. *Equipment Replacement in an Unsteady Eco - nomy.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 38, pp.497-506.
- Clark, A., 1996. *Happy Couplings: Emergence and explanatory interlock.* In Boden, M. (Ed.) The Philosophy of Artificial Life, Oxford University Press.
- Coetzee, J.L., 1997a. *Towards a General Maintenance Model.* Proceedings of the 1997 IFRIM workshop, Hongkong.
- Coetzee, J.L., 1997b. *Maintenance.* Textbook Maintenance Publishers, Pretoria.
- Coetzee, J.L.., 1999. *A holistic approach to the maintenance"problem"*. Journal of Qua - lity in Maintenance Engineering, Vol. 5, Nº 3.
- Coetzee, J.L., 2000/1. *Reducing Maintenance Risk – a macro perspective.* I.M.E. Main - tenance Conference, 2000/1.
- Coffman, E.G. (ed.), 1976.*Computer and Job-Shop Scheduling Theory*. Wiley, New York.
- Coffman, E.G., Garey, M.R. and Johnson, D.S., 1978. *An Application of Bib Packing to Multiprocessor Scheduling.* Society for Industrial and Applied Mathematics. Jour - nal on Applied Mathematics, Vol. 7, pp. 1-17.
- Collier, J.D. and Muller, S.J., 1998. *The dynamical basis of emergence in natural hierarchies.* En Farre, G. Oksala, T. (eds.) Emergence, Complexity, Hierarchy and Organization, Selected and Edited Papers from the ECHO III Conference, Acta Polytecnica Scandinavica, MA91. Finish Academy of Technology, Espoo.
- Conde Collado, J., Cárcel Carrasco, J., Rodríguez Méndez, M., 2003. *Análisis compara - tivo de sistemas de organización de mantenimiento: RCM, TPM y Mantenimiento Efectivo.* V Congreso de Ingeniería de Organización, Valladolid - Burgos, 4-5 de sep - tiembre de 2003.
- Cook, T.M. and Russell, R.A., 1978. *Simulation and Statistical Analysis of Stochastic Vehicle Routing with Timing Constraints.* Decision Sciences, Vol. 9, pp. 672-687.
- Corder, G.C., 1962. *Modern Maintenance.* Seminar Publication of the British Pro - ductivity Council, London.
- Cox III, J.F., Schleier, J.G., 2010. *Theory of Constraints Handbook.* Mc Graw Hill.
- Crespo Márquez, A., 2007. *The Maintenance Management Framework, Models and Methods for Complex Systems Maintenance.* Springer, London.
- Croker, J., 1999. *Effectiveness of maintenance.* Journal of Quality in Maintenance Engi - neering, Vol. 5, Nº 4, pp.307-313.
- Cua, K.O., McKone, K.E. and Schroeder, R.G., 2001. *Relationships between imple - mentation of TQM, JIT, and TPM and manufacturing performance.* Journal of Opera - tions Management, Vol. 19 No. 6, pp. 675-94.

- Dahl, P., Horman, M., Pohlman, T. and Pulaski, M., 2005. *Evaluating Design – Built – Operate - Maintain Delivery as tool for Sustainability*. American Society of Civil Engineers. ISBN 978-0-7844-0754-7.
- Daley, D.T., 2008. *Understanding the path to failure*. DTD080001. SKF Reliability Systems.
- De Bruyne, K. et al., 1985. *Doorlichting van een Onderhoudsafdeling*. Masters Thesis, Industrieel Beleid – KULeuven.
- De Cuyper, V.et al., 1986. *Het Gebruik van een Mikrocomputer voor Onderhoud - sopvolging*. Masters Thesis, Industrieel Beleid – KULeuven.
- De Groote, P., 1995. *Maintenance performance analysis: a practical approach*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.1, No.2, pp. 4-24.
- Dekker, R., 1989. *Aplication of maintenance optimization models*. Working papers, Shell Laboratories, Amsterdam.
- Dekker, R., 1996. *Aplications of maintenance optimization models: a review and ana - lysis*. Reliability Engineering and System Safety, Vol.51, Nº special issue on mainte - nance and reliability, pp. 229-240.
- Dekker, R., Wilderman, R. E., Van Der Duyn Schouten, F. A., 1997. *A review of multi - component maintenance models with economic dependence*. Mathematical Methods of Operational Research, Vol.45, Nº 3, pp. 411-435.
- Dekker, R. and Scarf, P.A., 1998. *On the impact of optimization models in maintenance decision making: the state of the art*. Reliability Engineering and System Safety, Vol. 60, Nº 2, pp.111-119.
- Dempster, M.A.H., Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G. (eds.), 1981. *Deterministic and Sto - chatic Scheduling*. Proceedings of the NATO Advanced Study and Research Institute on Theoretical Approaches to Scheduling Problems, Durham (England), July 1981.
- De Quidt, D. and Rousere, F., 1990. *Planning en Scheduling in een Chemisch Bedrijf*. Masters Thesis, Industrieel Beleid - KULeuven.
- Desrosiers, J., Soumis, F., Desrochers, M. and Sauve, M., 1983. *Routing and Scheduling by Branch-and-Bound on Time Windows*. Working Paper, EHEC-Montreal (Canada).
- DGS Int., 1987. *Checklist, Maintenance Consultants (Industrializing Countries)*. Ghent (Belgium).
- Dhavale, D.G. and Otterson, G.L., 1980. *Maintenance by Priority*. Industrial Engi - neering, Vol.12, Feb., pp.24-27.
- Dhillon, B.S., 2006. *Maintainability, Maintenance and Reliability for Engineers*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Dieulle, L., Berenguer, C., Grall, A. and Roussignol, M., 2003. *Sequential condition-based maintenance scheduling for a deteriorating system*. European Journal of Opera - tional Research, Vol. 150, Nº2, pp.451-461.
- Dijkstra, M.C., Kroon, L.G., van Nunen, J.A.E.E. and Salomon, M., 1990. *A Decision Support System for Capacity Planning of Aircraft Maintenance Personnel*. Working Paper 89/58, Rotterdam School of Management, Faculteit Bedrijfskunde, Erasmus Universiteit (Rotterdam).
- Dobson, G. and Karmarkar, U.S., 1986. *Simultaneous Resource Scheduling to Minimize Flow Times*. Working Paper, W.E. Simon School, University of Rochester (Rochester, NY).
- Dobson, G., Karmarkar, U.S. and Rummel, J., 1988. *A Closed Loop Automatic Scheduling System (CLASS)*. Working Paper, W.E. Simon School, University of Rochester (Rochester, NY).
- Dogramaci, A., 1984. *Production Scheduling of Independent Jobs on Parallel Identical Processors*. International Journal of Production Research, Vol. 22, pp. 535-548.
- Dudzinski, K. and Walukiewicz, S., 1987. *Exact Method for the Knapsack Problem and its Generalizations*. European Journal of Operational Research, Vol. 28, pp 3-21.
- Duffuaa, S.O. and Al- Sultan, K.S., 1999. *A stochastic programming model for sche - duling maintenance personnel*. Applied Mathematical Modelling, Vol. 23, Nº 5, pp. 385-397.

- Dwight, R., 1999. *Searching for real maintenance performance measures.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.5, No.3, pp. 258-75.
- Egol, L., 1988. *Computerized Maintenance Management Saves Money.* Chemical and Engineering, Vol. 95, Sept., 1988, pp. 107-109.
- El Hayek, M., van Voorthuysen, E. and Kelly, D.W., 2005. *Optimizing life cycle cost of complex machinery with rotable modules using simulation.* Journal of Quality in Main - tenance Engineering, Vol. 11, No. 4, pp. 333-47.
- Elmaghraby, S.E. and Elimam, A.A., 1980. *Knapsack-Based Approaches to the Makespan Problem on Multiple Processors.* AIIE Transactions, Vol. 12, pp. 87-96.
- Enscore, E.E. and Burns, D.L., 1983. *Dynamic Scheduling of a Preventive Maintenance Programme.* International Journal of Production Research, Vol. 21, pp. 357-368, 1983.
- Fabrycky, W.J. and Blanchard, B.S., 1991. *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*. Prentice Hall. ISBN 0135383234.
- Fabricky Wolter J., 1997. *Análisis de coste de ciclo de vida de los sistemas*. Madrid: Isdefe. ISBN 84-89338-15-9.
- Fernandéz Steinko, Armando, 2006. *El futuro del mantenimiento industrial: dimensiones, estrategias y cambios organizativos.* Revista Mantenimiento, noviembre 2006, pp. 5-15.
- Fitzgerald, G., Philippides, A. and Probert, S., 1999. *Information systems development: maintenance and enhancement. Findings from a UK study.* International Journal of Information Management, Vol. 19, No. 4, pp. 319-28.
- Finley, H.F., 1985. *Monitoring Maintenance Performance with an Electronic Spreadsheet.* Hydrocarbon Processing, Vol. 65, pp. 66-68.
- Ford, F.N., Bradbard, D.A., Ledbetter, W.N. and Cox, J.F., 1987. *Use of Operation Research in Production Management.* Production and Inventory Management, Vol. 28, 3rd Q., pp. 59-63.
- Fox, R.E., 1982. *MRP, Kanban and OPT- What´s best?* APICS Conference Proceeding, pp. 482- 485.
- Fraser, J.M. and Posey, J.W., 1989. *A Framework for Replacement Analysis.* European Journal of Operational Research, Vol. 40, pp. 43-57.
- French, S., 1982. *Sequencing and Scheduling: An Introduction to the Mathematics of the Job Shop.* Ellis Horwood, Chichester.
- Garey, M.R. and Johnson, D.S., 1979. *Computers and Intractibility: A Guide to the Theory of NP Completeness.* Freeman, San Francisco.
- Garg, Amik and Deshmukh, S.G., 2006. *Maintenance management: Literature review and directions.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, Nº 3, 2006, pp. 205-238.
- Gelders, L. and VanWassenhove, L., 1984. *Produktiebesturingssystemen: Een Vergelij - king van MRP, Kanban en OPT.* Economisch en Social Tijdschrift, Vol. 38, pp. 665-678.
- Geraerds, W., 1989a. *Achieving Peak Performance Through New and Improved Mainte - nance Methods.* 1st Major Canadian Conference on Maintenance Management. Toronto, June 28-29.
- Geraerds, W.M.J., 1989b. *The cost of Downtime for maintenance: Preliminary Considerations* .Maintenance Management International, Vol. 5, pp.13-21. Elsevier Science Publishers B.V.
- Geraerds, W.M.J., 1990. *The EUT- maintenance model.* IFRIM-report 90/01, Einhoven.
- Gertsbakh, I.B. and Kordonskiy, K.B., 1969. *Models of failure.* Springer Berlag, Berlín.
- Gertsbakh, I.B., 1977. *Models of Preventive Maintenance.* North Holland, Amsterdam.
- Gertsbakh, I.B., 1989. *Statistical Reliability Theory.* Marcel Dekker, New York.
- Geuens, J. and Van Wassenhove, L., 1987. *Routing.* Working Paper IB87, Industrieel Beleid - KULeuven.
- Gilbert, J.P. and Finch, B.J., 1985. *Maintenance Management: Keeping up whit Produc - tion´s Changing Trends and Technologies.* Journal of Operations Management, Vol. 6, No.1, pp. 1- 12.

- Gillett, B.E., 1975. *Introduction to Operations Research.* McGraw-Hill, NY.
- Gillham B., 2001. *Case study research methods (*2 edn.*).* Continuum, New York. ISBN 0-8264-4796-1.
- Golden, B.L. and Yee, J.R., 1979. *A Framework for Probabilistic Vehicle Routing.* AIIE Transactions, Vol. 11, pp. 109-112.
- Goldratt, E.M. and Cox, J., 1986a. *The Goal.* Croton – on – Hudson (NY). North River Press.
- Goldratt, E.M. and Fox, R.E., 1986b. *The Race.* Croton – on – Hudson (NY). North River Press.
- Goldratt, E.M., 1988. *Computerized Shop Floor Control.* International Journal of Produc tion Research, Vol. 26, pp. 443-445.
- Goldratt, E.M, 1990. *The Haystack Syndrome: Sifting Information out the Data Ocean.* ISBN 9780884271840.
- González Fernández, F.J., 2005. *Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avan - zado (2ª ed.).* Fundación Confemetal, Madrid. ISBN 84-96169-49-9.
- Gopalakrishnan, M., Mohan, S. and He, Z., 2001. *A tabu search heuristic for preventive maintenance scheduling.* Computers and Industrial Engineering, Vol. 40, Nº 1, pp. 149-160.
- Goti, A., 2007. *Optimización del Mantenimiento Preventivo en Sistemas Productivos Me diante Algorítmos Genéticos.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Goti, A., Oyarbide – Zubillaga, A., Sánchez, A., 2007. *Optimizing preventive mainte - nance by combining discrete event simulation and genetic algorithms.* Hydrocarbon Processing, Vol.86, Nº 10, pp. 115-122.
- Goti-Elordi, A., Egaña-Errasti, M. M., Iturritza- Pérez de Albéniz, A., 2009. *Encuesta sobre el estado del mantenimiento industrial en España.* Dyna Ingeniería e Industria. Abril 2009, Vol.84, Nº 3, pp. 225-230.
- Grall, A., Diellu, L., Berenguer, C. and Roussignol, M., 2002. *Continuous time predicti - ve maintenance scheduling for a deteriorating system.* IEEE Transactions on Reliability, Vol. 51, Nº 2, pp.141-150.
- Grant, T.J., 1986. *Lessons for O.R. from A.I.: A Scheduling Case Study.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 37, pp. 41-57, 1986.
- Graves, S.C, 1981. *A Review of Production Scheduling*. Operations Research, Vol. 29, pp. 646-675.
- Graves, S.C, 1988. *Determining the Spares and Staffing Levels for a Repair Depot* Journal of Manufacturing and Operations Management, Vol. 1, pp. 227-241.
- Greenwood, G. and Gupta, A., 2000. *Workforce contrained preventive maintenance scheduling using evolution strategies.* Decision Sciences, Vol. 31, Nº 4, pp. 883-859.
- Gross, D. and Harris, C., 1985. *Fundamentals of Queueing Theory.* Wiley, New York.
- Gupta, S.K. and Kyparisis, J., 1987. *Single Machine Scheduling Research.* OMEGA, Vol. 15, pp. 207-227.
- Gusfield, D., 1984. *Bounds for Naive Multiple Machine Scheduling with Release Times and Deadlines.* Journal of Algorithms, Vol. 5, pp. 1-6.
- Haarman, M., 2005. *Value Driven Maintenance.* Ingeniería y Gestión de Mantenimiento. Ed. Alción, Nº julio/agosto, pp. 28-31, Madrid.
- Hansen, R.C., 2001. *Overall Equipment Effectiveness - a Powerfull production /Mainte - nance Tool for Increased Profits*. Industrial Press INC., 2001. ISBN 0-8311-3138-1.
- Heber González, Raimundo, 1996. *Los presupuestos en el mantenimiento industrial.* Mantenimiento, pp. 47-49, mayo.
- Hendricks-Jansen, H., 1996. *Catching Ourseleves in the Act: situated activity, inter - active emergence, evolution, and human thought.* MIT Press.
- Henry, J., 2003. *Ensuring MSR Success. Applying a Reliability and Risk Focus to Make Maintenance Profitable.* SKF Reliability Systems, pp. 1-14, October.

- Helewaut, D. and Verhelst, H., 1986. *Een Informatiesysteem voor Planning en Opvolging van Onderhoud.* Masters Thesis, Industrieel Beleid KULeuven.
- Hickman, W.E. and Moore, W.D., 1986. *Managing the Maintenance Dollar*. Chemical Engineering, Vol. 93, April, pp. 68-77.
- Hibi, S., 1977. *How to Measure Maintenance Performance.* Nordica, HongKong.
- Hollnagel E. & Woods D. D., 1983. *Cognitive systems engineering: New wine in new bottles.* International Journal of Man-Machine Studies, 18, pp. 583-600.
- Hollnagel, E. & Woods, D. D., 2005. *Joint cognitive systems: The foundations of cognitive systems engineering.* Taylor & Francis.
- Holmgren, M., 2005. *Maintenance - related losses at the Swedish Rail.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.11, No.1, pp.5-18.
- Honig, M.L. and Ott, T.J., 1989. *On Waiting for Simultaneous Access to Two Resources.* Mathematics of Operations Research, Vol. 14, pp. 664-687.
- Hookham, J., 1981. *The use of failure statistics.*Terotechnica, 2, pp. 253-259.
- Hsu, J.L., 1988. *Equipment Replacement Policy: A Survey.* Production and Inventory Management, Vol. 29, 4th Q., pp.23-27.
- Infraspeed. , 2004. *Infraspeed.* Retrieved Januari 6, 2009, from HSL Zuid, De organisa - tie, Infraspeed:http://www.hslzuid.nl/hsl/organisatie/Infraspeed/index.jsp
- Ip, W.H., Kwong, C.K. and Fung, R., 2000. *Design of maintenance system in MRPII.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 6 No. 3, pp. 177-91.
- Iravani, S.M.R. and Duenyas, I., 2002. *Integrated maintenance and production control of a deteriorating production system.* IIE Transactions, Vol. 34 No. 5, pp. 423-35.
- Jardine, A.K.S., 1970. *Operational Research in Maintenance.* Manchester University Press, N.Y..
- Jenkins, A.L., Gebbie, R.J. and Jardine, A.K.S., 1988. *A Decision Support System for Equipment Main - tenance and Replacement.* Proceedings Operational Research '87, pp. 355-365.
- Johnson, D.S. and Monma, C.L., 1989. *Scheduling with Simultaneous Resource Requirements.* Working Paper, Bell Laboratories.
- Jones, M.S. and Tanchoco, J.M.A., 1987. *Replacement Policy: The Impact of Tech - nological Advances.* Engineering Costs and Production Economics, Vol. 11, pp. 79-86.
- Jones, R.B., 1995. *Risk- Based Management- Reliability – Centered Approach*. Gulf Publishing.
- Jonsson, P., 1999. *Company-wide integration of strategic maintenance: an empirical analysis.* International Journal of Production Economics, Vol. 60-61, pp. 155-164.
- Kaplan R. y Norton D., 1996b. *The Balanced Scorecard: Translating Strategy Into Action.* Boston: Harvard Business School Press.
- Kaplan R. y Norton D., 2000a. *Having trouble with your strategy? Then map it*. Harvard Business Review, 78 (5): 167.
- Kaplan R. y Norton D., 2000b. *The Strategy-Focused Organization: How Balanced Scorecard Companies Thrive in the New Business Environment*. Boston: Harvard Business School Press.
- Kaplan R. y Norton D., 2006a. *How to implement a new strategy without disrupting your organization*. Harvard Business Review, 84 (3): 100.
- Kaplan R. y Norton D., 2006b. *Alignment: Using the Balanced Scorecard to Create Corporate Synergies.* Boston: Harvard School Press.
- Kaplan, S., Garrick, B.J., 1981. *On the quantitative definition of risk.* Risk Analysis, Volume 1, pp. 11-27.
- Kaufman, R. J., 1970. *Life cycle costing: a decision-making tool for capital equipment acquisition.* Cost and Management, maart/april 1970, 21-28.
- Kawauchi, Y., Rausand, M., 1999. *Life-Cycle Cost analysis in oil and chemical process industries.*
- Keeter, B., 2002. *Managing Availability for Improved Bottom-line Results.* http: //www.reliability.com.au.

- Kelly, A., 1980. *A Review of the Maintenance Management Problem.* Terotechnica, Vol. 1, pp. 243-255.
- Kelly, A., 1984 a. *Maintenance Planning and Control*. Butterworths, London.
- Kelly, A., 1984b. *Maintenance Documentation and Computers*. Maintenance Manage - ment International, Vol. 4, pp. 251-267.
- Kharola, P.S. and Prem, V., 1986. *Maintenance Manpower and Inventory Planning in a Two- Level Repair- Inventory Systems: An Integrated Approach.* Maintenance Management International, Vol. 6, pp. 153-165.
- Kirkpatrick, S., Gellatt, C.D. and Vecchi, M.P., 1983. *Optimization by Simulated Annealing.* Science, Vol. 22, pp .671-680.
- Kleinrock, L., 1976. Queueing Systems (Vol. I and II). Wiley, New York.
- Kletz, T.. *HAZOD, and HAZAN -Identifying and Assessing Industry Hazards (4th edi - tion).* UK Institution of Chemical Engineers. Galliards, Great Yarmounth, UK.
- Koestenbaun, P., 1989. *Socrate et le Business.* InterEditions, París.
- Koizol, D.S., 1988. *A Job – Shop Operation.* Management Accounting, May 1988, pp. 44-49.
- Kumamoto, H., Henley, E.J., 1995. *Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists.* IEEE Press, New York, (2nd ed.).
- Kutucuoglu, K.Y., Hamali, J., Irani, Z. and Sharp, J.M.. *A framework for managing maintenance using performance measurements systems.* International Journal of Opera - tions & Production Management, Vol. 21, Nº 1, pp. 173-194, 2001.
- Lacroix, P. and Poot, D., 1986. *Evaluatie van de Plannings - en Opvolgingsproblematiek van een Onderhoudsdienst.* Masters Thesis, Industrieel Beleid - KULeuven.
- Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. and Schmoys, D.B., 1985. *The Trave - ling Salesman Problem.* Wiley, New York.
- Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G., Schmoys, D.B., 1989. *Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity.* Working Paper 8945/A, Econometrisch Instituut, Erasmus Universiteit (Rotterdam).
- Lazowska, E.D., Zahorjan, J., Graham, G.S. and Sevcik, K.C., 1984. *Quantitative System Performance.* Prentice Hall, Englewood Cliffs (NJ).
- Legát, V., Jurcla, V., Hladik, T., 2004. *Money Centered Maintenance*. 17th European Maintenance Congress: Euromaintenance 2004. Barcelona, AEM, 2004. pp. 239-250 (sin ISBN).
- Leung, L.C. and Tanchoco, J.M.A., 1987. *Multiple Machine Replacement within an Integrated System Framework.* The Engineering Economist, Vol. 3, pp.89-114.
- Levitt, J., 2009. *The Handbook of Maintenance Management (2nd Ed.).* Industrial Press, Inc., New York. ISBN 978-0-8311-3389-4.
- Luck, W.S., 1956. *Now You Can Really Measure Maintenance Performance.* Factory Management and Maintenance, Vol. 114, pp. 81-86.
- Luxhoj, J.T. and Jones, M.S., 1986. *A Framework for Replacement Modeling Assum - ptions.* The Engineering Economist, Vol. 32, pp. 39-49.
- Mabini, M.C., 1988. *Maintenance Scheduling for a University*. Masters Thesis, Indus - trieel Beleid - KÜLeuven.
- MacCall, J.J., 1965. *Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey.* Ma - nagement Science, Vol. 11, pp. 493-524.
- Madu, C.N., 2000. *Competing through maintenance strategies*. International Journal of Operations & Reliability Maintenance, Vol.17, No.9, pp. 937-48.
- Maennel, W., 1982. *Abgrenzung und Organisatorische Einordnung der Anlagenwirts - chaft im Industriebetrief.* Beitraege aus Wissenschaft und Praxis II, Bierich, Wiesbaden.
- Maes, J., Pintelon, L. and Van Wassenhove, L., 1989. *An Integrated Approach to Perfor mance Indicators.* Working Paper, Industriel Beleid-KuLeuven.
- Malmholt, O., 1988. *Man in Maintenance.* Euro – Maintenance Conference. Finland.
- Mann, L. and Coates, E.R., 1980. *Evaluating a Computer for Maintenance Management*. Industrial Engineering, Vol. 12, pp. 28-32.

- Mann, I., 1983a. *Maintenance Management.* Lexington Press. Lexington, M.A..
- Mann, L. and Bostock, H.H., 1983 b. *Short Range Maintenance Planning /Scheduling using Network Analysis.* Hydrocarbon Processing, Vol. 63, March, pp. 97-101.
- Maramatus, R. and Y. Tanaka, 1982. *Maintenance Management and Control.* Handbook of Industrial Engineering, Jonh Wiley and Sons, New York.
- Marcelis, W.J., 1984. *Onderhoudsbesturing in Ontwikkeling.* Kluwer, Deventer.
- Markeset, T., & Kumar, U., 2003. *Integration of RAMS and risk analysis in product design and development work processes.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, pp. 393-410.
- Martello, S. and Toth, P., 1980. *Solution of the 0 - 1 Multiple Knapsack Problem.* European Journal Operational Research, Vol. 4, pp. 276 - 283.
- Martello, S. and Toth, P., 1988. *A New Algorithm for the 0 - 1 Knapsack Problem.* Ma - nagement Science, Vol. 34, pp. 633- 644.
- Maramatus, R.y Y. Tanaka, 1982. *Maintenance Management and Control.* Handbook of Industrial Engineering, Jonh Wiley and Sons, New York.
- Martin, H., 1989. *Evaluation Methods of Standard Software.* lst Major Canadian Conference on Maintenance Management, Toronto, June 28-29.
- Martorell, S., et al., April 2004. *RAMS + C informed decision – making with application to multiobjective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms.* Reliability Engineering & System Safety, Vol 87, pp.65-75. Elsevier Ltd.
- Massón Guerra, J.L. y Truño I Gual, J., 2006. *La cuarta generación Balanced Scorecard: Revisión crítica de la literatura conceptual y empírica.* Bellaterra, mayo.
- Melnyck, S.A. and Carter, Ph.L., 1986. *Scheduling, Sequencing and Dispatching: Alternati - ve Perspectives.* Production and Inventory Management, Vol. 27, 2nd Q, pp. 58-68.
- Mill, John Stuart, 2002. *A System of Logic.* University Press of the Pacific, Honolulu, ISBN 1- 4102-0252-6.
- Mitchell, R.D. and Burgess, J., 1980. *Justifying a Computer for Maintenance Management.* Plant Engineering, Vol. 34, pp. 83-85.
- Modarres, M., 1993. *Reliability and Risk Analysis.* Marcel Dekker, Inc., New York.
- Modarres, M., Kaminstrkiy, M., Krivtsov,V., 1999. *Reliability Engineering and Risk Analysis.* Marcel Dekker, Inc., New York.
- Monden, Y., 1985. *Innovations in Management: The Japanese Corporation.* Industrial Engineering and Management Press, Norcross (Georgia, Atl).
- Monden, Y., 1986. *Applying Just in Time: The American/Japanese Experience.* Indus - trial Engineering and Management Press Norcross (Georgia, Atl.).
- Mjema, E., 2002. *An analysis of personnel capacity requirement in the maintenance department by using a simulation method.* Journal of Quality in Maintenance Engi - neering, Vol.8, Nº3, pp. 253-273.
- Nagurur, N.N. and Kaewplang, J., 1999. *An object oriented decision support system for maintenance management.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 5, No. 3, pp. 248-57.
- Nakajima, S., 1982. *The Organization of Maintenance in Japanese Industry.* Maintenan - ce Management International, Vol. 3, pp. 82-83.
- Nakajima, S., 1989a. *Implementing to Total Productive Maintenance.* ACAPT, St Cathe rines (Canada).
- Nakajima, S., 1989b. *Introduction to Total Productive Maintenance.* ACAPT, St Cathe - rines (Canada).
- Narayan, V., 2004. *Effective Maintenance Management. Risk and Reliability Strategies for optimizing performance.* Industrial Press, Inc., New York. ISBN 0-8311-3178-0.
- NASA, 1995. SP-610S.NASA Systems Engineering Handbook.
- Newbrough, E.T., 1967. *Effective Maintenance Management.* McGraw-Hill, N.Y.
- Niebel, B., 1985. *Engineering Maintenance Management.* Marcel Dekker, N. Y.

- Nikolopoulos, K., Metaxiotis, K., Lekatis, N. and Assimakopoulos, V., 2003. *Integrating industrial maintenance strategy into ERP.* Industrial Management and Data Systems, Vol. 103, No. 3, pp. 184-91.
- Noiret, A., 1978. *Evaluation de l'Efficacité de la Maintenance.* Conference sur L'Entretíen dans les Industries des Procédés, Louvain-la-Neuve, November.
- Oberhofer, A.F., 1978. *Anlagenwirtschaft.* Berg und Huettenmaennische Monatshefte, Vol. 123, pp. 2-35.
- O´Connor, P.D.T., 1991. *Practical Reliability Engineering.* Wiley, N.Y.
- Ogink, G., & Al-Jibouri, S. ,2008. *A proposed model for implementing RAMS in the design process in construction.* pp. 1-14.
- O'Grady, P.J., 1988. *Putting the Just in Time Philosophy into Practice.* Kogan Page, London.
- O'hEigeartaigh, M., Lenstra, J.K. and Rinnooy Kan, A.H.G., 1985. *Combinatorial Optimi - zation: Annotated Bibliographies*. Wiley, Chichester.
- Oke, S.A., 2005. *An analytical model for the optimisation of maintenance profitability.* International Journal of Productivity and Performance Management, Vol.54, No.1/2, pp.173-94.
- Oliver, David W., et al. , 1997. *Engineering Complex Systems with Models and Objects.* McGraw-Hill., pp. 85–94. ISBN 0070481881.
- Ozatalay, S., 1983. *MRP and Maintenance Scheduling.* APICS Conference Proceedings, pp. 475-479.
- Panwalker, S.S. and Iskander, W., 1977. *A Survey of Scheduling Rules.* Operations Research, Vol. 25, pp. 45 - 61.
- Parida, A. y Kumar, U., 2006. *Maintenance Performance Measurement (MPM): issues and challenges.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, No. 3, pp. 239-51.
- Patton, I.D., 1980. *Maintainability and Maintenance Management.* Instrument Society of America. Research Triangle Park, N.C.
- Pham, H. and Wang, H., 1996. *Invited review on imperfect maintenance.* European Journal of Operational Research, Vol. 94, No. 1, pp. 425-38.
- Philips, D.T, Ravindran, A. and Solberg, J., 1976. *Operations Research: Principles and Practice.* Wiley, NY.
- Pierce, F.R., 1986. *Maintenance: Do More with Less.* Hydrocarbon Processing, Vol. 66, pp. 101-107.
- Pierskalla, W.J. and Voelker, J.A., 1976. *A Survey of Maintenance Models: The Control and Surveillance of Deteriorating Systems.* Naval Research Logistics Quaterly, Vol. 23, pp. 353-388.
- Pintelon, Liliane, 1990. *Performance Reporting and Decision Tools for Maintenance Management.* Katholieke Universiteit Leuven, Ph. May.
- Pintelon, L., Gelders, L.H., 1992. *Maintenance Management Decision Making.* Euro - pean Journal of Operational Research, 58(3), pp. 301-317.
- Pintelon, L. y Puyvelde, F.V., 1997. *Maintenance performance reporting systems: some experiences.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.3, No.1, pp. 4-15.
- Pintelon, L., Preez, N.D. and Puyvelde, F.V., 1999. *Information technology: opportuni - ties for maintenance management.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 5, No. 1, pp. 9-24.
- Pintelon, L., Kumar, P.S. and Vereecke, A., 2006. *Evaluating the Effectiveness of maintenance strategies.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, Nº 1, pp. 7-20.
- Pirkul, H., 1987. *A Heuristic Solution Procedure for the Multiconstraint Zero-One Knapsack Problem.* Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 34, pp. 161-172.

- Polimac, V. and Polimac, J., 2001. *Assessment of present maintenance practices and futures trends.* Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium IEEE, pp. 891-894.
- Pongpech, J., Murthy, D.N.P. and Boondiskulchock, R., 2006. *Maintenance strategies for used equipment under lease.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, Nº 1, pp. 52-67.
- Pottinger, K. and Sutton, S., 1983. *Maintenance Management: An Art or Science?* Maintenance Management International, Vol. 3, pp. 251-256.
- Priel, V.Z., 1962. *Twenty Ways to Track Maintenance Performance.* Factory, Vol.56, pp. 88-91.
- Ramo, Simon, Robin K. St.Clair, 1998. *The Systems Approach: Fresh Solutions to Complex Problems Through Combining Science and Practical Common Sense.*
- Raouf, A., 1994. *Improving capital productivity through maintenance.* International Journal of Operations & Production Management, Vol.14, No.7, pp. 44-52.
- Rausand, M., Hoyland, A., 2004. *System Reliability Theory. Model, Statistical Methods, and Applications (2ª ed.).* Jonh Wiley & Sons, Inc, New Jersey.
- Riggs, J.L. and Inoice, M.S., 1975. *Introduction to Operations Research and Manage - ment Science.* McGraw- Hill, NY.
- Rodríguez-Darnés, P., 2000. *Participación del mantenimiento en la competitividad industrial.* Dyna Ingeniería e Industria, febrero, pp. 10-13.
- Rolán Vázquez, José, 1996. *Gestión del mantenimiento en un entorno competitivo.* Mantenimiento, pp. 31-37, diciembre.
- Ross, G.T. and Soland, R.M., 1975. *A Branch and Bound Algorithm for the Generalized Assignment Problem.* Mathematical Programming, Vol. 8, pp. 91-103.
- Russell, R. and Igo, W., 1978. *An Assignment-Routing Problem.* Networks, Vol. 9, pp. 672-678.
- Satyanarayana, B. and Prasad, J.K., 1996. *Menu driven maintenance information system.* Industrial Engineering Journal, Vol. 25, No. 9, pp. 8-11.
- Scheele Nick, 2002. *The importance of UK manufacturing. We can make it better, manufacturing 2020 consultations recommendations report.*Uk: Foresight, 2002.
- Schmidt, G., 1988. *Scheduling Independent Tasks with Deadlines on Semi-Identical Processors.* Journal of the Operational Research Society, Vol.39, pp. 271-277.
- Schram, G. *System Reliability*. GS03002,http//www.apptitudexchange.com.
- Schram, G. *Availability.* S03004, http//www.apptitudexchange.com.
- Schram, G., 2003a. *Risk Analysis: An Introduction Into Risk, Risk Assessment, And Risk Management.* SKF Reliability Systems, pp. 1-19, April.
- Schram, G., 2003b. *Hazard and Operability Study (Hazod). To Prevent Undesired Events Happening.* SKF Reliability Systems, pp. 1- 8, September.
- Schram, G., 2003c. *Availability. An Introduction to Availability,its measures, and Mode- ling Techniques.* SKF Realiability Systems aptitudeXchange, 5271Viewridge Court San Diego, United States.
- Schram, G., 2003d. *FMEA. An introduction to failure mode and effects analysis.* GS02002. SKF Reliability Systems.
- Schram, G. and Barrat, M., 2004. *Asset Management: Principles and Enablers of Physical Asset Management.* SKF Reliability Systems, pp. 1-10, July.
- Seidmann, A. and Groenevelt, H., 1989. *Uptime Management.* CMOM Executive Course, W.E. Simon School. University of Rochester.
- Sherif, Y.S. & Smith, M.L., 1981. *Optimal maintenance models for systems subject to failure: a review.* Nav. Res. Log. Quart., 28.
- Sherif, Y.S., 1982. *Reliability analysis: optimal inspections and maintenance schedules of failing systems.* Micro. Reliab., 22.

- Silver, E.A. and Peterson, R., 1985. *Decision Systems for Inventory Management and Production Planning.* Wiley, NY.
- Simons, B., 1982. *On Scheduling with Release Times and Deadlines.* Research Paper, IBM Corporation.
- SKF Reliability System, 2004. *The Guide to Asset Efficiency Optimization for Improved Profitability.* SKF 5160, March.
- Sloan, T. W. and Shanthikumar, G., 2000. *Combined production and maintenance scheduling for a multiple product single machine production system.* Production and Operations Management, Vol.6, Nº 4, pp. 379-399.
- Smit, K., 1983. *Interactive Computer Systems for Maintenance Management.* Maintenance Management International, Vol. 7, pp. 7-15.
- Smith, D. J., 2005. *Reliability, Maintainability and Risk; Practical Methods for Engi - neers.* Butterworth-Heinemann.
- Souris, J.P., 1992. *El Mantenimiento. Fuente de Beneficios.* Ed. Díaz de Santos, Madrid. ISBN 84-7978-021-5.
- Stephan, A., 1999.*Emergenz: von der Unvorhersagbarkeit zur Selbstorganisation.* Dres - den, München: Dresden University Press.
- Stewart, W.R. and Golden, B.L., 1983. *Stochastic Vehicle Routing: A Comprehensive Approach.* European Journal of Operations Research, Vol. 14, pp. 371-385.
- Steward, F., 1996. *Transfer benchmarking strategies from other industries.* Power, pp. 44-47, March.
- Stinson, J.P. and Khumawala, B.M., 1987. *The Replacement of Machines in a Serially Dependent Multi-machine Production System.* International Journal of Production Research, Vol. 25, pp. 677- 688.
- Swanson, L., 2001. *Linking maintenance strategies to performance.* International Journal of Production Economics, Vol. 70, Nº 3, pp. 237-244.
- Taha, H.A., 1982. *Operation Research.* MacMillan, NY.
- Tam, A.S.B. and Price, J.W.H., 2008a. *A generic asset management framework for optimising maintenance investment decision.* Production Planning and Control: The Management of Operation, Vol. 19, No.4, pp. 287- 300.
- Tam, A.S.B. & Price, J.W.H., 2008b. *A maintenance prioritisation approach to maximi - se return on investment subject to time and budget constraints.* Journal of Quality Maintenance Engineering, Volume 14, Nº 3, pp. 272-289. Emerald Group Publishing Limited. DOI 10.1108/13552510810899472 Science Publishers B.V.
- Tanchoco, J.M.A. and Leung, L.C., 1987. *An Input – Output Model for Replacement Decisisons.* Engineering Costs and Production Economics, Vol. 11, pp. 69-78.
- Tapiero, C.S. and Venezia, I., 1979. *A Mean Variance Approach to the optimal Machine Maintenance and Replacement Problem.* Journal of the Operational Research Society, Vol.30, pp. 457-466.
- Takahashi, Y., 1981. *Maintenance Oriented Management via Total Participation.* Terotechnica, Vol. 2, pp.79 – 88.
- Taylor, W., 1981. *The use of Life Cycle Costing in Acquiring Physical Assets.* Long Range Planning, Vol. 14, No. 6, 32-43.
- Teller, Paul, 1992. *A Contemporary Look at Emergence.* Beckermann, et. al., eds.
- Thomson, G.L., 1968. *Optimal Maintenance Policy and Sale date of a Machine.* Management Science, Vol. 14, pp. 543-550.
- Tijms, H.C, 1986. *Stochastic Modeling and Analysis.* Wiley, New York.
- Tombari, H.A., 1982. *Designing a Maintenance Management System.* Production and Inventory Management, Vol. 23, 4th Q., pp. 139-147.
- Toomey, G., 2004. *Asset Efficiency Optimization Work Management Process.* SKF Reliability Systems, pp. 1-8, April.
- Tsang, A.H.C., 1998. *A strategic approach to managing maintenance performance.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.4, No.2, pp. 87-94.

- Tsang, A.H.C., Jardine, A.K.S. y Kolodny, H., 1999. *Measuring maintenance performance: a holistic approach.* International Journal of Operations & Production Management, Vol.19, No.7, pp. 691-715.
- Tsang, A.H.C., Yeung, W.K., Jardine, A.K.S. and Leung, B.P.K., 2006. *Data management for CBM optimization.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 12, Nº 1, pp.37-51, 2006.
- Tseng, S.T., Ruey, H.Y. and Ho, W.T., 1998. *Imperfect maintenance policies for deteriorating production systems.* International Journal of Production Economics, Vol. 55, No. 2, pp. 191-201.
- Tu, P.V.L., Yam, R., Tse, P. and Sun, A.O., 2001. *An integrated maintenance management system for an advanced manufacturing company.* International Journal of Manufacturing Technology, Vol. 17 No. 9, pp. 692-703.
- Valdez-Flores, C. & Feldman, R.M., 1989. *A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single unit systems.* Nav. Res. Log. Quart., 36.
- Vanneste, S.G., 1991. *A Markov model for opportunity maintenance.* Working paper. Dpto of Economics, Catholic University of Brabant, Tilburg.
- Van Rijn, C., 1987. *A Systems Engineering Approach to Reliability, Availability and Maintenance.* Conference on Foundations of Computer Aided Operations, Salt Lake City (Ut), July 5-10.
- Verheyen, P.A., 1979. *Economic Interpretation of Models for the Replacement of Machines.* European Journal of Operational Research, Vol. 3, pp. 150-156.
- Voss, C., et al, 1989. *Just in Time: A global Status Report.* IFS Publications – Springer – Verlag, Berlín.
- Voss, C.A., Ahlstrom, P. and Blackmon, K., 1997. *Benchmarking and operational performance: some empirical results.* International Journal of Operations & Production Management, Vol.17, No. 10, pp. 1046-58.
- Waeyenbergh, G. and Pintelon, L., 2002. *A framework for maintenance concept development.* International Journal of Production Economics, Vol. 77, No. 3, pp. 299-313.
- Wagner, H.M., Giglio, R.J. and Glaser, R.G., 1964. *Preventive Maintenance Scheduling.* Management Science, Vol. 10, pp. 316-334.
- Wang, H., 2002. *A survey of maintenance policies of deteriorating systems.* European Journal of Operational Research, Vol. 139, No. 3, pp. 469-89.
- Waters, C.D., 1987. *A Solution Procedure for the Vehicle Scheduling Problem Based on Iterative Route Improvement.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 38, pp. 833-839.
- Wauters, J., Mathot, J., 2002. *OEE- Overall Equipment Effectiveness.* ABB White Paper.
- Westerkamp, T.A., 2002. *Measuring information*. Industrial Engineer, Vol. 34, No. 11, pp. 39-43.
- Wiener, Norbert, 1998. *Cibernetica, o el control y comunicación en animales y maquinas* (en español, 2ª edición). Tusquets. ISBN 84-7223-452-5.
- Wilkinson, J.L. and Lowe, J.J., 1971. *A Computerized Information System that Works.* Plant Engineering, Vol. 25, May 13, pp. 68-100.
- Wilkinson, J.J., 1968. *How to Manage Maintenance.* Harvard Business Review, pp. 100-111.
- Winter, J.L., Zakrzewski, R.S. and King, R.E. (eds), 1984. *Maintenance Management for Quality Production.* Society of Manufacturing Engineering, Dearborn (Michigan).
- Wireman, T., 2004. *Benchmarking Best Practice in Maintenance Management.* Industrial Press, Inc., New York. ISBN 0-8311-3168-3.
- Wireman, T., 2005. *Developing Performance Indicators for Managing Performance.* Industrial Press, Inc., New York.
- Woods, D. D. & Hollnagel, E., 2006. *Joint cognitive systems: Patterns in cognitive systems engineering.* Taylor & Francis.

- Worral, B. M. and Mert, B., 1980. *Application of Dynamic Scheduling Rules in Maintenance Planning and Scheduling.* International Journal of Production Research, Vol. 18, pp.55-71.
- Wübbenhorst, K. L., 1986. *Life Cycle Costing for Construction Projects*. Long Range Planning, Vol. 19, No. 4, 87-97.
- Yin, R. K., 1989. *Case study research. Design and methods.* Sage Publications, London.
- Zaloom, V.A., 1982. *An Automated Procedure to Establish Workzone Boundaries for Air Force Facilities Maintenance Operations.* Journal of the Operational Research Society, Vol. 33, pp. 913-919.
- Zoeteman, A., & Braaksma, E., 2001. *An Approach to Improving the Performance of Rail Systems in a Design Phase.* World Conference on Railway Research (pp. 1-9). TU Delft.

- ***Aplicaciones.***

1. Proyecto de autopista de nuevo trazado en régimen de explotación indirecta.

- Adams, W.M., 2006. *The Future of Sustainability: Rethinking Environment and Develop ment in the Twentyfirst Century*. Report of the IUCN Renowned Thinkers -Meeting, 29 – 31 January.
- Aguado, A., Sergio Carrascón, S., Cavalaro, S., Puig, I., Senés, C., 2010. *Manual para el proyecto, construcción y gestión de pavimentos bicapas de hormigón.*U.P. de Cataluña.
- Akbari, H., Menon, S. y Rosenfeld, A., 2007. *Global Cooling: Effect of Urban Albedo on Global Temperature.* 2nd PALENC & 28th AIVC Conference, Crete, Sep 27-28.
- Alarcón Ibarra, J., 2003. *Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta*. Capítulo 2, Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.).
- Asaeda, T., Ca, V.T. y Wake, A., 1993. *Heating of paved ground and its effects on the near surface atmosphere.* Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Surface and Time Scales. Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS Publ.212.
- Asaeda, T., Ca, V.T. y Wake, A., 1995. *Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere.* Atmospheric Environment 30: 413 - 427.
- Athena Sustainable Materials Institute, 2006. *A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential*. Ottawa.
- BuenasTareas.com., 2012. Diseño de pavimentos asfálticos. Recuperado 02, 2012e http://www.buenastareas.com/ensayos/Dise%C3%B1o-De-Pavimentos-Asfalticos-/3497175. html
- CEMEX. *Estudios económicos de alternativas base cemento en firmes de carreteras y en infraestructura ferroviaría.*
- Crespo del Río, R., 1999. *Calidad ante la rodadura.* Jornadas sobre la calidad en el proyecto y la construcción, Barcelona 19 de mayo.
- Croney, D. and Croney, P., 1998. *Design and Performance of Road Pavements.* New York, NY: McGraw Hill.
- EUPAVE.- Pavimentos de hormigón.- Una alternativa inteligente y sostenible.
- FHWA (Federal Highway Administration), 1980. *Development and Use of Price Ad - justment Contract Provisions.* Technical Advisory No. 5080.3. Washington, DC: Fede - ral Highway Administration.
- FHWA, 1996. *Tire Pavement Noise and Safety Performance. Publication.* No. FHWA-SA-96-068. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- FHWA, 2009. *Considerations for Rigid vs. Flexible Pavement Designs when allowed as alternate bids.* Technical report. Report 0-6085-1. Washington, DC: Federal Highway Administration.

- Gajda, J.W. y Van Geem, M.G., 1997. *A Comparison of Six Environmental Impacts of Portland Cement Concrete and Asphalt Cement Concrete Pavement*. PCA R&D Serial No. 2068, Portland Cement Association.
- Garber, N.J. and Hoel, L.A., 2002.*Traffic&Highway Engineering.* 3rd edition, Pacific Grove, CA: Brooks - Cole.
- Global Cooling. Increasing Word Wide Urban Albedos to Ofsett CO2.
- Croney, D. and Croney, P., 1998. *Design and Performance of Road Pavements*. New York, NY: McGraw Hill.
- Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis and Design*. 2nd edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice - Hall.
- Hunter, R.N., 1994 ed. *Bituminous Mixtures in Road Construction.* London: Thomas Telford Ltd.
- iMcNerneym, M.T., Landsberger, B.J., Turen, T. y Pandelides, A. ,2000.*Comparative field measurements of tire/pavement noise of selected Texas pavements.* FHWA.FHWA/TX-7-2957-2.
- Jasienski, A., 2007. *Gestión de obras muy congestionadas. Ejemplos de Autopista de Bélgica.* Febelcem, Bélgica. Memorias del Seminario Internacional sobre rehabilitación de pavimentos de cemento. Guatemala 23 y 24 de abril. pp. 53-64.
- Junta de Castilla y León, Consejería de Fomento, Dirección General de Carreteras e Infraestructuras, 2004. *Recomendaciones de proyecto y construcción de firmes y pavimentos.*
- Kraemer, C., Albeada, R., 2004. *Evaluación técnico-económica de las secciones de firme de la Norma 6.1-IC.* VI Congreso Nacional de Firmes, 24 al 27 de mayo de 2004, León.
- Kubo, K., Kido, H. y Ito, M., 2006. *Study on pavement technologies to mitigate the heat island effect and their effectiveness.* 10th ICAP2006.
- McNerneym, M.T., Landsberger, B.J., Turen, T. y Pandelides, A., 2000. *Comparative field measurements of tire/pavement noise of selected Texas pavement*s. FHWA.FHWA/ TX-7-2957-2.
- Metz, L. D. y Ruhl, R. L., 1990. *Skidmark Signatures of ABS Equipped Passenger Cars.* SAE Technical Paper.
- MIT Pavement. *LCA Report.*
- NSTPW (Nova Scotia Transportation and Public Works), 1999. *Asphalt Concrete Pave - ment and Portland Cement Concrete Pavement.* Highway 104, Cumberland County, Year 5 of 5 Year Study.
- Osteret, J .F., Olivares Santiago, M., 1994. *Criterios básicos para el dimensionado de firmes (1).* Revista de Edificación, Nº 18, octubre 1994, pp. 23-30.
- Polcak, K.D., 1990. *Field Testing of the Effectiveness of Open Graded Asphalt Pavement in Reducing Tire Noise from Highway Vehicles.* Transportation Research Record 1265, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Polimón, J., 2008. *Avances tecnológicos. Criterios para la innovación* .Revista de Obras Públicas, Nº 3.485, pp. 37 – 42, febrero, 2008.
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chen, A., Taha, H. y Rosenfeld, A.H., 1997. *Paving Materials for Heat Island Mitigation.* LBL - 38074. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Akbari, H. y Harvey, J.T., 2000a. *Durability and Visibility Benefitsof Cooler Reflective Pavements.* LBNL - 43443. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H. y Chang, S.C., 2000b. *The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities.* LBNL - 43442. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Akbari, H. y Cooler, R.T., 2000c. *Reflective pavements give benefits be - yond energy savings: durability and illumination.* eScholarship Repository, Lawrence

Berkeley National Laboratory, University of California, University of California. University of California eScholarship Repository (UnitedStates). http:// repositories. cdlib.org/lbnl/ LBNL-45370.
- Rangaraju, P.R., Amirkhanian, S. y Guven Z., 2008. *Life Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection.* Clemson University and South Carolina Department of Transportation. Clemson, South Carolina.
- Ríos, B. de los, 2010. *Construcción de carreteras con elementos prefabricados de hormigón.* Tesis doctoral, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U. P .C., 3 de junio de 2010. Directores: Antonio Aguado y Félix. Pérez.
- Stark, R.E., 1986. *Road Surfaces Reflectance Influences Lighting Design.* Lighting Design +Applications. April.
- Taylor, G.W., Farrell, P. y Woodside, A., 2002. *Additional Analysis of the Effect of Pavement Structure on Truck Fuel Consumption.* Prepared for Government of Canada Action Plan 2000 on Climate Change, Concrete Roads Advisory Committee.
- Taylor, G.W. y Patten, J.D., 2006. *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption.*
- UN (United Nations General Assembly), 2005. *World Summit Outcome*. Resolution A/60/1, adopted by the General Assembly on 15 September 2005. Retrieved on: 2009-02-17.
- Van Heystraeten, G. y Moraux, C., 1990. *Ten Years Experience of Porous Asphalt in Belgium.* Transportation Research Record 1265, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- WDT (Wisconsin Department of Transportation), 1996. *Wisconsin Pavement Performan ce Report*. Madison, WI.
- Yang, N.C., 1972. *Design of Functional Pavements.* New York, NY: McGraw Hill Book Company.
- Zaniewski, J.P., Butler, B.C., Cunningham, G., Elkins, G.E., Paggi, M.S. y Machemehl, R., 1982. *Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption and Pavement type and Condition Factors.* Final Report # DOT-FH-11-9678, Federal Highway Administration, Washing - ton, DC.

2. Contrato de Mantenimiento y Otorgamiento de Garantías de "Proyecto para suminis - tro, ejecución y explotación de un parque eólico".

- Bansal, R.C., Shatti, T.S., Kothari, D.P., 2002. *On some of the design aspects of wind energy conversion systems.* Energy Conversion and Management, vol.43, nº 16, pp. 2175-87.
- Barrat, M., 2004. *Life-Cycle Costing (LCC). An introduction to Life Cycle Costing, Including basic methods, examples, and references.* SKF Realiability Systems aptitudeXchange, 5271Viewridge Court San Diego, United States.
- Blanchard, B.S., 1991. *Design to Cost, Life-Cycle Cost.* The Annual reliability and Maintainability Symposium. Evans Associates, North Carolina.
- Boukas, E.K. and Liu, Z.K., 2001. *Production and maintenance control for manufactu - ring system. IEEE* Transactions on Automatic Control, Vol. 46, No. 9, pp. 1455 - 60.
- Cambell, J.D. and Jardine, A.K.S, 2001. *Maintenance Excellence - Optimizing Equip - ment Life - Cycle decision.* Marcel Dekker, Inc., ISBN 0-8247-0497-5.
- Jenkins, N., 1993(a). *Electrical design of wind farms.* Proc. IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, Athens, Greece, pp. 990-994, sept. 5-8, 1993.
- Jenkins, N., 1993(b). *Engineering wind farms.* Power Engineering Journal, vol 7, nº 2, pp. 53-60, April 1993.
- Jonhson, G.L. *Wind energy systems* (Electronic Edition). http://www. rpc.com.au / products /windturbines/windbook/WindTOC.html.

- Krokoszinski, H-J., March 2003. *Efficiency and Effectiveness of wind farms – Keys to cost optimized operation and maintenance.* Renevable energy, vol. 28. Elselvier Science Ltd.
- Liyanage, J.P. y Kumar, U., 2003. *Towards a value-based view on operations and maintenance performance management.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol 6, Nº 4, 2003, pp.333-50.
- Moore, W.J.and Starr, A.G., 2006. *An intelligent maintenance system for continuous cost-based priorisation of maintenance activities.* Computers in Industry, Vol.57, No.6, pp. 595 -606.
- Pickford, J., 2001. (eds.). *Mastering Risk.* Volume 1: Concepts. Financial Times. Prentice Hall.
- Sousa de Oliveira, Wagner, Jorge Fernandes, Antonio, 2011. *Economy Feasibility Applied to Wind Energy Projects.* Inst. J. Emerg. Sci.,1(4), 659-681, December 2011. ISSN: 2222-4254.
- Thuesen, G.J. and W.J.B. Fabrycky, 1993. *Engineering Economy*. 8th edition, Prentice – Hall, Inc.
- Walker J.F., Jenkins, N., 1997. *Wind energy technology*. Jonh Wiley and Sons, Ltd./Inc., New York.
- Weinstein, L. and Chung, 1999. *Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment.* Computers & Operation Research, Vol. 26, Nos 10-11, pp. 1059-74.

3. Proyecto de infraestructura para la ejecución de una pista de aterrizaje y dique de abrigo.

- EHE 2008. Real Decreto 1247 del 18 de julio de 2008.
- EHA /3011/ Orden de 4 de Octubre de 2007.
- EFHE-02. BOE número 187 de 6 de Agosto de 2002.
- RC- 08. *Recepción de Cementos.* RD 956/2008 de 6 de Junio.
- RC- 97. *Recepción de Cementos.* RD 779/1997 de 30 de Mayo.
- Rebut, P., 1975. *Centrales Hormigoneras.* Editions Eyrolles – París. ISBN 84-7146-1625.
- Tiktin, J., 1998. *Procedimientos Generales de Construcción.* E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. ISBN 84-7493-205-X

- ***Anexos.***

I. El Benchmarking como proceso de gestión.

- Akao, Yoji (ed.), 1993. *Despliegue de funciones de calidad*. TGP – HOSHIN, S.L., I.S.B.N.: 84-87022-88-X.
- Bosser, J.L., 1991. *Quality Function Deployment: a practioner´s approach.* ASQC Quality Press, Marcel Dekker, Inc.
- Kaiser Associates, INC., 1995. *Guía Práctica del Benchmarking.* Ediciones Díaz de Santos, S.A., I.S.B.N.: 84-7978-193-9.
- Yam, R.C.M., Tse, P., Ling, L. y Fung, F., 2000. *Enhancement of maintenance manage - ment trough benchmarking.* Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol.6, No.4, pp. 224 – 40.

II. Guía básica del equipo de gestión. Descripción de Funciones y responsabilida - des para el éxito de la implementación del sistema.

- Wireman, T., 2004. *Benchmarking Best Practice in Maintenance Management.* Indus - trial Press, Inc., pp. 69 -78, New York. ISBN 0-8311-3168-3.

III. Guía básica para la planificación de la función mantenimiento.

- Alfares, H.K., Khursheed, S.N., Noman, S.M., 2005. *Integrating quality and maintenance decisions in a production-inventory model for deteriorating items.* International Journal of Production Research, Vol. 43, No.5, pp. 899-911.
- Al-Najjar, B. and Alsyouf, I., 2003. *Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. International Journal of Production Economics,* Vol. 84, No.1, pp. 85-100.
- Andrews, J.D., Moss, T.R., 1993. *Reliability and Risk Assessment.* Logman Group UK.
- Boukas, E.K. and Liu, Z.K., 2001. *Production and maintenance control for manufacturing system. IEEE* Transactions on Automatic Control, Vol.46, No.9, pp. 1455-60.
- Casady, C.R. and Kutanoglu, E., 2005. *Integrating preventive maintenance planning and production scheluding for a single machine.* IEEE Transactions on Reliability,Vol.54, No.2, pp. 304-9.
- Fenner R.A., 2000. *Approaches to sewer maintenance: a review.* Urban Water, Vol.2, No.4, pp. 343-56.
- Labib, A.W., O´ Connor, R.F. and Williams, G.B., 2004. *An effective maintenance system the analytic hierarchy process.* Integrated Manufacturing Systems, Vol.9, No.2, pp. 87-98.
- Moore, W.J.and Starr, A.G., 2006. *An intelligent maintenance system for continuous cost-based priorisation of maintenance activities.* Computers in Industry, Vol.57, No.6, pp.595-606.
- Pickford, J., 2001(eds.). *Mastering Risk.* Volume 1: Concepts. Financial Times. Prentice Hall.
- SRA(The Society for Risk Analysis).http:// www.sra.org)
- SRA Europe (The Society for Risk Analysis in Europe).http:// www.sraeurope.org.
- Weinstein, L. and Chung, 1999. *Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment.* Computers & Operation Research,Vol.26, Nos 10 - 11, pp 1059-74.

IV. Coste del Ciclo de Vida (LCC).

- Aaroe, R., et al., 1989. *Reliability prediction handbook, computer-based process safety systems.* SINTEF Safety and Reliability.
- Alarcon, Jr., M.E., and Donaldson, L.M., 1979. *Support Cost Comparison Methodology.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 254-261.
- Andrew J.D., Moss T.R., 1993. *Reliability and Risk Assessment.* Longman Scientific & Technica.
- Allan, R.N., SO, T .Y.P, et al., 1989. *An Integrated Data Base and Reliability Assessment of Electrical Distribution Systems.* Proceedings of the 6th EuReDatA Conference, pp. 840-847.
- API RP 580/581. *Risk based inspection.*
- Bertini, S., Fracchia, M., et al., 1998. *Electric ship propulsion RAM performances: Sensitivity analysis.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 1389-1394.
- Blanchard, B.S., et al., 1995. *Maintainability.* John Wiley & Sons, Inc.
- Blanchard, B.S. and Fabrycky, W.J., 1998. *Systems Engineering and Analysis (3rd edition).* Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering.
- Bodsberg. L., et al, 1994. *Reliability quantification of control and safety systems.* ThePDS-II method, SINTEF Safety and Reliability.
- Bouissou, M. and Bourgade, E., 1997. *Unavailability Evaluation and Allocation at the Design Stage for Electric Power Plants: Methods and Tools.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 91-99.
- BS5760 (Part2). *Guide to the assessment of reliability.*

- Centre for Chemical Process Safety (CCPS), 1995. *Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis.* American Institute of Chemical Engineers (AIChE).
- Chan, C.K., Saraidaridis, C.I., et al., 1997. *Sequential Sampling Plans for Early-Life Reliability Assessment.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 131-135.
- Clarke, J.D., 1990. *Life Cycle Cost: An examination of its application in the United States and potential for use in the Australian defence forces.* Thesis of M.S, Naval Postgraduate School.
- Coit, D.W. and Smith, A.E., 1997. *Considering Risk Profiles in Design Optimization for Series-Parallel Systems.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 271-277.
- Comer, P., 1989. *Software Data Collection and the Software Data Library.* Proceedings of the 6th EuReDatA Conference, pp. 824-839.
- Coutinho, J. de S., 1979. *M113A1 Estimated Provisioning Versus Field Experience.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 231-242.
- Csenki, A., 1998. *Reliability and dependability measures for systems modelled by Markov and semi-Markov processes-A review.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 581-586.
- Daugherty, G.L., 1991. *Two-level Maintenance: How do you get there.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 397-399.
- Denson, W.K. and Keene, S., 1998. *A New Reliability Prediction Tool.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 15-22.
- Doerre,P., 1989. *Stochastic Reliability Analysis- Its Application to Complex Redundancy Systems.* Proceedings of the 6th EuReDatA Conference 1989, pp. 155-166.
- Dougan, K.W. and Reilly, M.C., 1993. *Quantitative reliability methods improve plant uptime.* Hydrocarbon processing, Aug. '93, pp. 131-141.
- Eisaman, Jr., J.E., 1989. *The numbers game with the logistics support analysis record (LSAR).*Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 328-331.
- EPA 40CFR68: *Chemical accident prevention provisions.*
- Fabbro, R.M., 1979. *Availability: A Low-Density Deployment Case Study.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 247-253.
- Fabrycky, W.J and Blanchard, B.S, 1991. *Life-cycle cost and economic analysis.* Prentice Hall International Series in Industrial and Systems Engineering.
- Followell, D.A., 1995. *Enhancing Supportability through Life-Cycle Definitions.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 402-409.
- González Fernández, F.J., 2008. *Gestión económica del mantenimiento.* Cuadernos AEM de Mantenimiento, Vol. 5. ISBN: 978-84-8701-10-07.
- Goossens, L.H.J., Kraan, B.C., et al., 1998. *COSYMA accident consequence Uncertainty analysis: Procedure and first results.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 191-197.
- Grabski, F., 1998. *Some methods of Bayesian nonparametric estimation in reliability.* Proceedings of ESREL'98 (ISBN 90 5410 966 1), pp. 641-646.
- Greene, L.E. and Shaw, B.L., 1990.*The Steps for Successful Life Cycle Cost Analysis.*CH2881-1/90/0000-1209, EEE, pp. 1209-1216.
- Hansen, G.K., 1997. *Dependability of distributed computer control systems, Cand. Scientist.* Thesis, the Norwegian University of Technology and Science.
- Hoeyland, A. and Rausand, M., 1994. *System Reliability Theory - Models and Statistical Methods.* John Wiley & Sons, Inc.
- Hokstad, P. and Jensen R., 1998. *Predicting the failure rate for components that go through a degradation state.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 389-396.

- Hurst, D.J., 1995. *Operational Availability Modeling from Risk and Impact Analysis.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 391-396.
- IEC60300-3-1. *Analysis techniques for dependability: Guide on methodology.*
- IEC60300-3-3: *Life cycle costing.*
- IEC60300-3-11(Draft). *Reliability centered management.*
- IEC60706-4. *Guide on Maintainability of Equipment: Maintenance and Maintenance Support Planning.*
- IEC61025. *Fault tree analysis (FTA).*
- EC61078. *Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram method.*
- IEC61165. *Application on Markov techniques.*
- Isograph Direct Ltd. http://www. isograph.com.
- Item software Inc. http://www. itemsoft.com.
- Joyce, P.A., Withers, T .A, et al., 1998. *Application of genetic algorithms to optimum offshore plant design.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 665-671.
- Kenna, T. M. and Oliverson, R., 1997. *Glossary of Reliabiliy and Maintenance Terms.* Gulf Publishing Company.
- Kirwan, B., 1998. *Human Factor & Human Reliability in Offshore Systems.* Material of a intensive course at SINTEF.
- Kolowrocki, K. and Kurowicka, D., 1998. *Domains of attraction of limit reliability functions.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 673-679.
- Kortner, H., 1989. *An Analytic Method to Estimate Uncertainty in a Risk Function*. Proceedings of the 6th EuReDatA Conference, pp. 195-205.
- Lees, F.P., 1996. *Loss Prevention in the Process Industries (2nd edition)*. Butterworths.
- Lewis, E.E., 1994. *Introduction to reliability engineering (2nd edition).* John Wiley & Sons, Inc.
- Lindqvist, B.H. and Amundrustad, H., 1998. *Markov models for periodically tested components.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 191-19.
- Locks, M.O., 1995. *Reliability, Maintainability and Availability Assessment.* ASQC Quality Press, Milwaukee, Wisconsin.
- Maggio, G., 1996. *Space Shuttle Probabilistic Risk Assessment: Methodology & Application.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 121-132.
- Majeske, K.D. and Herrin, G.D., 1998. *Determining Warranty Benefits for Automobile Design Changes.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 94-99.
- Marseguerra, M., Padovani, E., et al., 1998. S*ensitivity analysis of nonlinear reliability model.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 1395-1401.
- McArthur, C.J. and Snyder, H.M., 1989. *Life Cycle Cost The Logistics Support Analysis Connection.* CH2759-9/89/0000-1206, 1989 IEEE, pp. 1206-1209.
- McKenna, T. and Oliverson, R., 1997. *Glossary of Maintenance and Reliability Terms.* Gulf Publishing. ISBN 0-88415-360-6.
- Mitchell, B.F. and Murry, R.J., 1996. *Predicting Operational Availability for Systems with Redundant, Repairable Components and Multiple Sparing Levels.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 301-305.
- Moss, T.R. and Sheppard G.T., 1989. *Common - Cause Failure-Evidence from Sellafield.* Proceedings of the 6th EuReDatA Conference, pp. 141-154.
- Myrick, Al., 1989. *Sparing Analysis – A Multi-Use Plan.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 296-300.
- NORSOK Z-CR-008. *Criticality classification method.*
- NORSOK Z-016. *Regularity management & reliability technology.*
- O'connor, P.D.T., 1985. *Practical Reliability Engeneering (2nd edition)* .John Wiley & Sons, Inc.

- Oeien, K., Sklet, S., et al., 1998. *Development of Risk Level Indicators for a Petroleum Production Platform.* Proceedings of 9th Int'l Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, pp. 382-393.
- Paisie, J.E., 1998. *When to buy spare parts.* Hydrocarbon Processing, Jan.'98, pp. 61-63.
- Platis, A.N., Limnios, N.E., et al., 1997. *Asymptotic Availability of Systems Modeled by Cyclic Non-Homogeneous Markov Chains.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 293-297.
- Porn, K., 1998. *A new measure of uncertainty importance- Theory and applications.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 1403-1408.
- Salazar, D., Carrasquero, Galván, B., 2005. *Exploiting Comparative Studies Using Criteria: Generating Knowledge from an Analyst's Perspective.* In C.A. Coello, A. Hernández, and E. Zitzler, editors, EMO 2005, LNCS 3410, Guana-Juato, México, pp. 221–234. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- SAE ARP-4293: *Life cycle cost - Techniques and applications.*
- Scarrone, M., Piccinini, N, et al., 1989. *A Reliability Data Bank for the Natural Gas Distribution Industry.* Proceedings of the 6th EuReDatA Conference, pp. 90-103.
- Schram, G., 2002. *Root Cause Analysis.* SKF Reliability Systems.
- Signoret, J.P., 1998. *Availability of petroleum installation by using Markov processes and Petri net modelling, Risk and Reliability in Marine Technology.* Edited by C. Guedes Soares, published by A.A.Balkema, pp. 455-472.
- SINTEF Industrial Management, 1997. OREDA (Offshore Reliability Data), 3rd Edition.
- Susova, G.M. and Petrov, A.N., 1997. *Markov Model-Based Reliability and Safety Evaluation for Aircraft Maintenance-System Optimization.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 29-36.
- Tripp, H. and Propst, J., 1995. *Using R&M Analysis to Calculate Economic Risk in the Process Industries.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 356-361.
- Vassiliadis, C.G. and Pistikopoulos, E.N., 1998.*Design and maintenance optimization of chemical process under uncertainty.* Proceedings of ESREL'98(ISBN 90 5410 966 1), pp. 255-26.
- Vassiliadis, C.G. and Pistikopoulos, E.N., 1998.*On the Interactions of Chemical-Process Design under Uncertainty and Maintenance-Optimisation.* Proceedings of IEEE Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 302-307.
- Witt, J.H., 1990. *UNISAM- An Extension of UNIRAM for Spares Optimization.* A technical paper presented in 17th Inter-ram Conference for the Electric Power Industry.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- ABC *(Activity Based Costing):* Análisis de Costes Basado en Actividades.
- ABM *(Activity Based Management)*: Gestión Basada en Actividades.
- ABM *(Agent Based Model*): Sistemas Basados en Agentes.
- Activo físico: Elemento considerado formalmente como contable. Conjunto de ítems de carácter permanente que una empresa utiliza como medio de explotación y que normalmente forma parte del inventario.
- ACE: Agent Based Computational Economic.
- AEMO´s: Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo.
- AHP *(Analytic Hierarchy Process-Proceso Analítico Jerárquico)*: Es una técnica estructurada para tratar con decisiones complejas. En vez de prescribir la decisión "correcta", ayuda a los decisores a encontrar la solución que mejor se ajusta a sus necesidades y a su compresión del problema. Provee un marco de referencia racional y comprensivo para estructurar un problema de decisión, para represen - tar y cuantificar sus elementos, para relacionar esos elementos a los objetivos generales, y para evaluar alternativas de solución.
- AMD: Ayuda Multicriterio a la Decisión.
- Análisis DAFO: Análisis de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades.
- Avería *(Breakdown):* suceso que deja *inoperativa* la unidad de producción debi - do a un fallo absoluto.
- Árbol de fallos *(fault-tree):* Sistema lógico secuencial de acontecimientos utilizado para el análisis de fiabilidad de un item.
- Backlog: En los trabajos de mantenimiento se define como la cantidad de trabajo necesario, actualmente identificado, a ser realizado por el departamento de mante nimiento. Esta cantidad de trabajo es medida en horas. Muchos han intentado medir este parámetro en función del número de órdenes de trabajo, porcentaje de horas de producción, etc, pero no han funcionado. La única medida que recoge realmente la realidad del parámetro es el número de horas de trabajo que han de realizarse. Para calcular este parámetro, aparte de conocer las horas de trabajo de mantenimiento necesarias, es también necesario entender la capacidad actual de la fuerza de trabajo. La fórmula para su cálculo es :

Backlog = (horas de trabajo identificadas) / Capacidad del equipo de mantenimiento por semana (en horas).

- BPR *(Business Process Reengineering):* Reingeniería de los Procesos de Negocio.
- BSC *(Balanced Scorecard):* Cuadro de Mando Integral (CMI, en sus siglas en español). Técnica que introduce una combinación de medidas financieras y no financiera que traducen la visión y estrategia de la organización en objetivos e iniciativas cuantificables (Kaplan y Norton, 2000).
- CAPEX *(Capital Expenditure)**:*** Gastos de Capital.
- CBM: Mantenimiento Basado en la Condición. Mantenimiento preventivo ba - sado en la monitorización del funcionamiento y/o de los parámetros del elemento, y las acciones subsiguientes. Equivale al término mantenimiento predictivo.
- CBS *(Cost Breakdown Structure):* Estructura desagregada de costes.
- CM: Mantenimiento Correctivo. Mantenimiento efectuado a un item cuando la avería ya se ha producido, restituyéndolo a condición admisible de utilización. Puede, o no, estar planificado.
- Ciclo de vida *(Life - Cycle):* Según McKenna, T. y Oliverson, R. (1997), se define como las fases a través de las cuales un item, producto, equipo o sistema

pasa desde su concepción hasta su traspaso/eliminación. Intervalo de tiempo que comienza con el inicio del diseño y termina con la retirada del elemento.

- CIMM: Gestión del mantenimiento integrada asistida por ordenador.
- Condition monitoring: Comprobación del estado real de un item mediante control sistemático periódico o continuo de un parámetro o variable significativa. Se traduce por *control de condición o control de estado,* y se utiliza, normalmente, cuando la comprobación es continua y muy automatizada.
- Conductores de costes *(Cost driver):* Elementos del LCC que tienen un impacto importante sobre el análisis *(IEC60300-3-3).*
- Coste de adquisición: Gastos totales ocasionados por la compra de un item, su transporte, montaje y, en general, la preparación para ponerlo en condiciones de realizar su función.
- Coste directo del mantenimiento *(maintenance cost):* Se puede definir como el coste de evitación del daño o el coste de disponibilidad.
- Coste indirecto del mantenimiento *(damage cost):* Gastos derivados de las pérdidas de producción, rendimiento y calidad, pérdida de imagen y de los daños a la seguridad y el medioambiente ocasionados por la avería de un item. Se puede definir como el coste de indisponibilidad.
- Coste del Ciclo de Vida *(Life – Cycle Cost).* Según McKenna, T. y Oliverson, R., (1997), representa el coste total de una pieza de un equipo o sistema a lo largo de todo su tiempo de vida (total de todos los costes generados, o pronosticados, durante el diseño, desarrollo, producción, operación, mantenimiento y procesos secundarios de soporte). Incluye los costes directos, indirectos, recurrentes y no recurrentes, tales como: la adquisición, instalación, operación, mantenimiento, mejoras y eliminación o traspaso.
- Coste de utilización: Gastos de operación, mantenimiento, mejora y modificación de un item.
- Curva de la bañera: Representación gráfica característica que relaciona la tasa de fallos de un item con su tiempo de operación. Utilizable para elementos sujetos a degradaciones o deterioros con el tiempo.
- Defecto *(fallo absoluto):* Fallo que inhabilita, de forma absoluta, la capacidad de operar. La frontera entre un fallo y un defecto es el boundary failure (límite de fallo).
- D&C *(Design & Construct):* Contratos integrados para el Diseño y Construcción de proyectos.
- DBM *(Design & Built & Maintain)*: Contratos integrados para el Diseño, Construcción y Mantenimiento de proyectos.
- DBFM *(Design, Build, Finance and Maintain):* Contratos integrados para el Diseño, Construcción, Mantenimiento y Financiación de proyectos.
- Diagnosis: Deducción de la naturaleza de un fallo basada en los síntomas detectados o en el análisis de curvas evolutivas y de tendencias de una variable.
- Disponibilidad *(Availability, A):* La disponibilidad de un equipo, en general, viene representada por su capacidad de estar en estado para funcionar, sin fallo, bajo unas condiciones especificadas durante un periodo dado. La disponibilidad, o más directamente la indisponibilidad, depende no solamente del efecto downtime, sino también de la probabilidad de fallo para realizar su función (efecto de no fiabilidad).

  La disponibilidad de un sistema se puede determinar a través de la siguiente fór-

mula general :

$$Availability = \frac{Uptime}{Uptime + downtime}$$

- DOE: Diseño de experimentos.
- DOM *(Design-out maintenance):* Mantenimiento perfectivo. Conjunto de proyectos diseñados después de la puesta en producción, para mejorar el rendimiento o la mantenibilidad.
- Downtime: Es la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo representati – vo (normalmente el tiempo de producción teórico), para los cuales una unidad de producción no está operativa debido a tareas de mantenimiento. Se puede distinguir entre el downtime planificado y el no planificado.
- DSS *(Decision System Support):* Sistemas de Soporte a la Toma de Decisiones.
- ECM: Mantenimiento Centrado en la Efectividad.
- Ecuaciones de compensación: Modelo matemático para la conversión/traslación, a términos económicos, de las "garantías de desempeño". Se expresan a través de las denominadas "fórmulas de compensación". Pueden ser positivas (bonus) y negativas (penaltis).En este trabajo son utilizadas, principalmente, para: cuantifi - car económicamente los costes (penalizaciones) y beneficios (bonificaciones) diferidos de una STM; para mejorar, en el proceso de selección de la mejor alternativa en la fase de diseño, la precisión y exactitud de la componente de coste total; como instrumento para valorar económicamente la efectividad total de una alternativa.
- Eficiencia del Proyecto *(E.P.)*: En este trabajo se define como un Factor Correc - tor que se introduce para compensar diferentes efectos, normalmente de carácter técninico (pérdidas eléctricas, de caudal, etc.), que minoran, en general, los resultatados teóricos previstos en proyecto. Es utilizado como factor en las fórmu- las para el cálculo de compensaciones (penalizaciones y bonificaciones). Suele venir representado por el factor de emplazazamiento o distribución en planta (Layout Factor, L.F).
- ERP *(Enterprise Resources Planning):* Planificación de los Recursos de la empresa.
- Especificaciones de funcionamiento *(Fuctional performance, FP):* En algunos casos, el cambio en el estado físico de una unidad de producción puede conducir a una disminución gradual de su rendimiento (disminución en la calidad del producto, del número de unidades producidas, del nivel de disponibilidad, etc.). Se define, en este trabajo, las Especificaciones de funcionamiento (functional performance) como el conjunto de factores (índices de performance: IP´s) utilizados para caracterizar el funcionamiento de un sistema/ componente/subsis - tema de acuerdo con los requerimientos del cliente. Los valores establecidos para los mismos (umbrales) permiten valorar el nivel del rendimiento y establecer las compensaciones.
- ETA *(Event- Tree Analysis):* Análisis del Árbol de Sucesos. Análisis de escena - rios posibles.
- Factor de Layout *(L.F.):* Representa las pérdidas de eficiencia de los subsistemas y sus componentes vinculadas al emplazamiento y la distribución en planta.

- Factor de Planificación *(Planning Factor, P.F.):* Se utiliza para medir la utiliza - ción de la instalación en el tiempo de producción teórico. Es un factor en el que se recogen y contabilizan las "pérdidas externas" (downtime planificado).
- Fallo *(failure):* Se define como una interrupción de la capacidad funcional o disminución del rendimiento por debajo de un umbral establecido en las especificaciones funcionales. (Martorell, S.,et al., 2004)
- FBM: Mantenimiento Basado en el Fallo.
- Fiabilidad *(Reliability, R):* Representa la capacidad para responder y continuar operando sin fallo, y bajo determinadas condiciones específicas, durante un periodo de tiempo dado o edad. (Martorell, S., et al., 2004)
  En la práctica, la fiabilidad se determina a través de la siguiente fórmula general:

$$R = 1 - \frac{\textit{Número de fallos}}{\textit{Tiempo total de operación}}$$

- Fiabilidad natural: Es la fiabilidad propia/inherente del equipo (sin recibir man - teninimiento); depende directamente de las características físicas o de diseño. (Martorell, S., et al., 2004)
- Fiabilidad intrínseca: Es la agregada (en principio mayor que la natural) en base a la cantidad de mantenimiento de calidad realizado (usualmente preventivo). (Martorell, S., et al., 2004)
- FMEA *(Failure Mode and Effects Analysis):* Técnica para la identificación,estu - dio de los efectos y consecuencias (sobre producción, medioambiente, segu - ridad) de los principales modos de fallo que pueden ocurrir durante la vida de los subsistemas.
- FMECA *(Failure Mode and Effects and Criticality Analysis):* Análisis de criticidad y de efectos de modos de fallo.
- FPM: Mantenimiento de Periodo Fijo.
- FTA *(Fault - Tree Analysis):* Análisis del Árbol de Fallos.
- Función requerida: Función o combinación de funciones de un elemento que se consideran necesarias para proporcionar un servicio dado.
- Garantías del desempeño en el funcionamiento ("*garantías de performance*"): En este trabajo de tesis, son los niveles mínimos (umbrales) de los factores de funcio namiento seleccionados (índices de performance: IP´s) que constituyen las deno - minadas Especificaciones de funcionamiento que debe cumplir una STM para ser aceptada. Son usadas como herramienta para la mejora continua del diseño de una alternativa, minimizar los impactos sobre el cliente/usuario de una solución, y transferir los costes/beneficios de la misma a la "Parte" responsable de su diseño y elección. Ponen en valor, a través de las consecuencias (efectos econó - micos diferidos: positivos o negativos), el modelo de toma de decisiones basado en el riesgo desarrollado en este trabajo. Forman parte del proceso de decisión (en el nivel 1) y de selección de la mejor alternativa. Han de ser consensuadas por las "Partes".
- GMAO *(CMMS, por sus siglas en inglés)*: Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador. Programa y/o sistema informático que facilita todas las herra - mientas necesarias para la Gestión del Mantenimiento Industrial.
- HSE: Seguridad, Salud y Medioambiente.
- IBM: Mantenimiento Basado en la Inspección.
- IDSS: Intelligent Decision Support System.

- IMDM *(Integrated multicriteria decision making):* Modelo que brinda la posibilidad de realizar un análisis exhaustivo de alternativas y permite evaluar y comprender sus estructuras de costes para el diseño de soluciones equilibradas en las dimensiones técnicas y económica - financieras mediante la consideración de todos los criterios simultáneamente.
- IPDSS: Intelligent and Predictive Decision Support System.
- IP´s *(index performance, por sus siglas en inglés):* Indicadores/índices de desem - peño-performance.
- IPM: Índices de Productividad del mantenimiento.
- JIT *(Just-In-Time):* Justo a Tiempo. Esta filosofía se traduce en la reducción de los niveles de inventarios y trabajos en curso (optimización de los recursos financieros).
- KPI´s *(Key Performance Indexs):* Indicadores Claves de Funcionamiento.
- LCC *(Life Cycle Costing):* Coste del Ciclo de Vida. Proceso para la estimación y evaluación del coste total de adquisición, operación, mantenimiento y elimina - ción/ traspaso durante la vida proyectada para un equipo. Típicamente utilizado como técnica de comparación de la mejor alternativa u opción.(Aptitudexchange Glossary)
- LCCA *(Life Cycle Cost Analysis):* Análisis del Coste del Ciclo de Vida.
- LLCA-dynamic: Análisis del coste del ciclo de vida basado en el análisis de riesgos.
- LCP *(Life Cycle Performance):* Rendimiento del Ciclo Vida.
- Marco de referencia: La noción marco es usada como en modelos conceptuales estándares representables en términos computacionales; y si además es denomi - nado como “de referencia”, entonces es empleado como una estructura concep - tual, usada por grupos de investigación para resolver o guiar cuestiones com - plejas sobre algún área de conocimiento a través de una descripción o aproximación genérica.
- Mantenimiento *(Maintenance, M):* El mantenimiento representa, según Marto - rell, et al., el conjunto de actividades realizadas sobre el equipo con objeto de evaluar, conservar o restaurar su capacidad operativa.
- MCDA *(Multiple Criteria Decision Analysis):* Análisis de decisión Multicriterio.
- MCDM *(Multiple criteria decision – making):* Toma de decisiones multicriterio.
- Mecanismo de fallo: Procesos físicos, químicos, o de otro tipo, que conducen o que han conducido al fallo.
- Mejora: Combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión, destinadas a mejorar la seguridad de funcionamiento de un elemento sin cambiar su función requerida.
- MILP: Programación Lineal Entera Mixta.
- MIS: Sistema de Información del Mantenimiento.
- MMIS: Sistema de Información para la Gestión del Mantenimiento.
- MMT *(Maintenance Management Toolkit):* Herramientas para la gestión del Mantenimiento.
- Modelo de referencia: Es empleado para hacer referencia a una representación abstracta de entidades y sus relaciones involucradas en el ámbito de un problema para mejorar la eficiencia y eficacia de la empresa. Desde un contexto computacional, los modelos de referencia forman la base conceptual para el

desarrollo de modelos más concretos y para las implementaciones de un determinado ámbito.

- Modo de fallo: Método mediante el cual se establece la incapacidad de un elemento para desarrollar una función requerida.
- Monitorización: Actividad desarrollada manual o automáticamente, destinada a observar el estado actual de un elemento.
- M.P.: Mantenimiento preventivo. Conjunto de rutinas planificadas realizadas sobre los elementos del sistema con el fin de mantener el mismo en un nivel óptimo de rendimiento que reduzca la aparición de incidencias futuras.
- M.Pd: Mantenimiento predictivo. Conjunto de análisis orientados a estimar la aparición y comportamiento de las incidencias.
- MPM: Maintenance Performance Measurement.
- MRO: Mantenimiento, Reparación, Operación.
- MRP *(Manufacturing Resources Planning):* Planificación de los Recursos de fabricación.
- MSR *(Maintenance Strategy Review)*: Método de Revisión/análisis de la estrategia de mantenimiento.
- MTBF *(Mean Time Between Failure -Tiempo de funcionamiento medio entre fallos):* Representa el coeficiente de fallo de un sistema. Esperanza matemática del tiempo de funcionamiento entre fallos. Intervalo de tiempo más probable entre un arranque y la aparición de un fallo. Mientras mayor sea su valor, mayor es la confiabilidad del componente o equipo.
- MTTR *(Mean Time To Repair-Tiempo de reparación medio):* Representa el downtime, en unidades de tiempo, asociado al mantenimiento realizado. Esperanza matemática del tiempo de reparación. Es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado. El Tiempo Promedio para Reparar es un parámetro de medición asociado a la mantenibilidad. Una medida a ser minimizada será el tiempo medio utilizado para reparar *(1 / MTTR).*
- OBM: Mantenimiento Basado en la Oportunidad.
- ODC *(Output Dimension Cost):* Medida de las necesidades de producción y de los objetivos de prestación de servicios para operar un activo. La dimensión salida incluye las interrupciones planificadas requeridas para cumplir con los requerimientos de seguridad, calidad y normativos/legales. Se utiliza como base para definir el tiempo disponible para mantenimiento.
- ODR: Fiabilidad Conducida por el Operador (observación).
- OEE *(Overall Equipment Effectiveness):* Eficiencia Global de un Equipo. Es una medida de la eficiencia real al aprovechar los recursos integrando no sólo las pérdidas por fallos, sino también ante paradas programadas y por pérdidas de calidad.
- OEM: Optimización Evolutiva Multiobjetivo.
- OM *(Operation Management):* Gestión de Operaciones.
- OM/MM *(Operation Management/Maintenance Management):* Gestión de Operaciones / Gestión del Mantenimiento.
- O&M *(Operation & Maintenance):* Operación & Mantenimiento.
- OPEX *(Operation Expenditure):* Gastos de Operación.

- OR/MS: Técnicas de Investigación Operativa y la Ciencia de la Gestión.
- O.T.: Orden de trabajo. Instrucción detallada y escrita que define el trabajo que debe realizarse por la organización de mantenimiento.
- Outsourcing: Delegación total o parcial de funciones de procesos de negocio a otra empresa junto con parte del control administrativo y operacional.
- Overhaul *(reparación o revisión general):* Revisión minuciosa y, en su caso, reparación extensa de un item, o de una parte importante del mismo, para que recupere su condición admisible de utilización. Equivale al término de parada general.
- Parada *(shutdown):* Evento que deja *indisponible* la unidad de producción como resultado de una decisión de mantenimiento.
- PBS *(Project Break Structure):* Desagregación de la estructura del proyecto.
- Perfil de costes *(cost profile):* Representación gráfica, o en tabla, que muestra la distribución de costes de un producto a lo largo de su ciclo total o parcial de vida.(IEC60300-3-3: Life cycle costing)
- PHA: Preliminary Hazard Analysis.
- Plan de mantenimiento: Conjunto estructurado de tareas que comprenden las actividades, los procedimientos, los recursos y la duración necesaria para ejecutar el mantenimiento.
- P.M.: Mantenimiento Preventivo. Mantenimiento consistente en realizar ciertas reparaciones, o cambios de componentes o piezas, según intervalos de tiempo, o según determinados criterios, prefijados para reducir la probabilidad de avería o pérdida de rendimiento de un item. Siempre se planifica. Se divide, a su vez, en sistemático, predictivo y reglamentario.
- PMT: Testing Post-Maintenance.
- PMS: Sistema de Medida del Performance (desempeño*)*.
- POM: Problemas de Optimización Multiobjetivo.
- PARA *(Probability Risk Assesment):* Metodología más utilizada para el análisis cuantitativo del riesgo. Brinda la lista de escenarios de riesgos, incluyendo sus resultados y probabilidades. Suele estar soportada por técnicas como el análisis preliminar de riesgos, FMEA, análisis de criticidad, estudios de operatividad y riesgos, análisis de árbol de casos/sucesos, análisis de árbol de fallos.
- PRM: Mantenimiento Fiable Proactivo (predictivo y correctivo).
- Proactividad: Actitud en la que se asume el pleno control de modo activo, tomando iniciativas en el desarrollo de acciones creativas para generar mejoras.
- Prognosis: Evitar o predecir los problemas e incidencias analizando comporta - mientos pasados en base al conocimiento y prediciendo comportamientos futuros.
- Punto de rentabilidad técnica: Es aquel que, desde un punto de vista de coste del ciclo de vida unitario, la línea de ingresos o de beneficios que aporta la instala - ción, sistema o maquinaria, es igual o superior a la línea de costes.
- QFD *(Quality Function Deployment):* Despliegue de Funciones de Calidad.
- RAMS: Reliability, Availabilility, Maintenance & Safety.
- RBD: Diagrama de Bloque de Fiabilidad.
- RBI *(Risk-Based Inspection):* Inspección Basada en el Riesgo. Proceso de inspe cción sistemática que prioriza la inspección de equipos en base a la probabilidad y las consecuencias del fallo con objeto de reducir/optimizar el potencial de fallo catastrófico en equipos, el presupuesto y el personal dedicado.
- RBM *(Risk Based Maintenance)*: Mantenimiento Basado en el Riesgo.

- RCFA *(Root Cause Failure Analysis):* Análisis de fallos y Causa Raíz.
- RCM *(Reliability - Centered Maintenance):* Mantenimiento Centrado en la Fia - bilidad. Tecnología usada para determinar el mantenimiento idóneo de las má - quinas y equipos en su contexto operacional, buscando la mayor fiabilidad ope - rativa, partiendo del análisis de los posibles fallos, sus modos de fallos y sus consecuencias.
- Reactividad: Actitud pasiva y sujeta a las circunstancias.
- Re*DC (Resources Dimension Cost):* Gastos de mantenimiento y soporte logístico.
- RDC *(Risk Dimension Cost):* Coste de la Dimensión Riesgo. Coste de los sucesos y eventos no planificados y no esperados. En este trabajo, se consideran las conse cuencias, es decir, los costes diferidos (penalizaciones, multas, etc.) y las primas del seguro para cubrir eventos de baja probabilidad de ocurrencia. Se contem - plarían, en general, los costes relacionados con la indisponibilidad y la corrección del daño por no mantenimiento. Base para estimar el ROI_M.
- Reingeniería: Replanteamiento fundamental y el rediseño radical de los procesos del negocio, realizado para alcanzar una mejora dramática de las medidas críticas del rendimiento de los procesos, tales como el coste, la calidad, el servicio y rapidez.
- Requerimientos del cliente *(trade-off requirements):* Expresan las condiciones que hacen estar al cliente más satisfecho. Podrían ser: fiabilidad, disponibilidad, downtime, coste inicial, costes de mantenimiento, costes de riesgos específicos, entre otras.
- RTF: Funcionar hasta Fallar (Mantenimiento reactivo).
- Rebursfishment: Rehabilitación.
- Retrofit (mejoras): Conjunto de modificaciones, o cambios en el diseño, para su adaptación a un nuevo marco normativo, a mejorar la eficiencia, la efectividad, la seguridad, etc.
- R- LCCA *(Risk- Life Cycle Cost Analysis):* Análisis del Coste del Ciclo de Vida basado en el Análisis de Riesgos.
- ROFA *(Return On Fixed Assets):* Retorno sobre los activos físicos. Es un indi - cador utilizado en la planificación estratégica de los activos físicos de una instalación.
- ROI *(Return On Investment):* Retorno sobre la Inversión.
- ROI_M: Retorno de la inversión asociado a las acciones y recursos destinados a mantenimiento.
- RPN *(Risk Priority Number):* Número utilizado para graduar, y estimar a priori *(RPN - teórico)*, la necesidad de acciones correctivas y preventivas.

$$\boxed{\textbf{Risk Priority Number (RPN)}} = \textbf{Severidad (S)} \times \textbf{Ocurrencia(O)} \times \textbf{Detección(D)}$$

- SCADA: Paquete de control para la mejora de la producción.
- Seguridad – Soportabilidad *(Safety, S):* La componente- S en el término RAMS puede ir asociada a Seguridad o Soportabilidad; su asignación dependerá de la naturaleza de la aplicación. El cálculo de la componente de Seguridad es reali - zado frecuentemente a través del análisis de riesgo.
- SMM *(Strategic Maintenance Management):* Gestión Estratégica del Manteni - miento.

- Soportabilidad *(Supportability):*Característica inherente al diseño e instalación que permite un mantenimiento efectivo y eficiente y apoya al sistema a través del ciclo de vida planificado. (Blanchard,B.S. and Fabrycky,W.J.,1998)
- Sparing Analysis: Análisis del stock económico de repuestos.
- Stakeholders (*grupos de interés*): Conjunto de actores con intereses en un sistema.
- SRCM: Streamlined Reliability-Centered Maintenance.
- STM: Soluciones Técnicas y de Operación & Mantenimiento.
- STM+C: Soluciones Técnicas y de Operación & Mantenimiento Coste – efecti - vas.
- Throughput: En base a la definición general input/output utilizada para la des - cripción de los procesos de fabricación (Wauters J, Mathot J.), término utilizado para denominar lo que entra en un sistema en una forma y sale de el de otra (producto terminado).
- TIC´s: Tecnologías de la Información y la Comunicación.
- TMM: Gestión del Mantenimiento Total.
- Top – down *("de arriba abajo" o diseño descendente)*: En el modelo *top-down*, también conocido como diseño paso a paso (en algunos casos se utiliza como sinónimo de descomposición), inicialmente se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Los detalles del diseño se refinan en etapas posteriores mediante la descomposición del sistema a nivel de subsistema y componentes. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo.
  En contraste, en el diseño *bottom-up*, las partes individuales se diseñan con deta - lle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez, se enlazan hasta que se forma el sistema completo.
- TPM: Mantenimiento Productivo Total.
- Tiempo de funcionamiento entre fallos: Duración total del tiempo de operación entre dos fallos consecutivos de un elemento.
- TQM: Gestión de la Calidad Total.
- Trade – off: Tasa de intercambio.
- Trade – off requirements: En este trabajo se define como la tasa de intercambio referida a los objetivos e intereses del cliente.
- UBM: Mantenimiento Basado en el Uso.
- Uptime *(Tiempo de producción disponible)*: Es el tiempo en el cual la produ - cción puede ser planificada. Vendría representado por la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo representativo (normalmente el tiempo de produ - cción teórico) para los cuales una unidad de producción está operativa.
- Vida útil: Intervalo de tiempo, que bajo unas condiciones dadas, comienza en un instante de tiempo determinado y termina cuando la tasa de fallos se hace inaceptable, o bien cuando el elemento se considera irreparable como resultado de una avería o de otros factores relevantes.
- VMS: Mantenimiento Basado en la Vibración.
- WIP *(work – in- process):* Producto en proceso.

ANEXOS

ANEXO I

EL BENCHMARKING COMO PROCESO DE GESTIÓN.

EL BENCHMARKING COMO PROCE SO DE GESTIÓN. GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO.

Las etapas básicas del proceso, con especial énfasis en la gestión del mantenimiento, son:

(1) Identificación de las variables claves de funcionamiento del mantenimiento que necesitan ser referenciadas. La identificación de estos factores es fundamental para soportar los programas de mejora continua por comparación con los líderes del mercado sobre un "sistema de medidas estándar"(mismas variables utilizadas por otros operadores del sistema).

(2) Selección de las fuentes de información apropiadas para realizar el estudio: selección de las mejores prácticas y aprender de los líderes.

Es evidente que el benchmarking con otros competidores directos en el mismo sector es complicado pues supondría compartir información sensible. Para salvar esta dificultad se recurre a fuentes de información confidenciales (consultoras especializadas que facilitan bases de datos para el análisis).

(3) Diseño del proceso de medida y recogida de los datos de mantenimiento (DOE).

(4) Normalización y ajuste de la información medida y recogida. Creación de una base de información útil con datos homogéneos.

Con objeto de comparar los datos medidos y recogidos de la gestión del mantenimiento es necesario ajustar y normalizar (*homogenizar)* dichos datos con las condiciones de contexto de otros operadores del sector: ajustes por inflación, salarios, marcos reguladores (laboral, medioambiental); datos de operación y factores de diseño; otros. El objetivo de la normalización es asegurar una comparación imparcial de los datos para que sea útil.

(5) Análisis DAFO de los datos de mantenimiento.

Comparación con otras organizaciones líderes del mercado e identificación de fortalezas y debilidades del sistema O&M.

(6) Identificar ventajas competitivas y nichos de mercado: orientación del proceso de innovación.

El proceso de normalización anterior permite identificar las desviaciones positivas o negativas del funcionamiento/rendimiento en comparación con los líderes del mercado, lo que permite diseñar y cuantificar el programa de actuaciones.

(7) Programa de actuación: cambios y mejoras a introducir.

ANEXO II

GUÍA BÁSICA DEL EQUIPO DE GESTIÓN. DESCRIPCIÓN DE FUNCIONES Y RESPONSABILIDADES PARA EL ÉXITO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

ORGANIGRAMA PARA LA INFORMACIÓN Y GESTIÓN DEL MANTENI - MIENTO. GUÍA BÁSICA DEL EQUIPO DE GESTIÓN: TAREAS Y FUN - CIONES.

Para el diseño y éxito en la implementación de la *STM+C* resulta necesario que a nivel organizativo se realice la asignación de ciertas funciones, tareas y responsa - bilidades. Esta fase es crítica, pues la persona (trabajador o equipo) representa la fuen te principal de la que se extrae la información; constituye una pieza esencial para el éxito en la implementación y la consecución de los resultados. El objetivo de este apartado no es establecer la estructura organizacional del sistema. El propósito es proponer una guía básica del equipo de gestión, sus tareas y funciones. Aunque la organización no contemple cada uno de los puestos descritos a continuación, sí es importante que cada una de las tareas y responsabilidades que se describen sean desarrolladas y estén claramente asignadas en su estructura; es decir, puede suceder que la organización no contemple el puesto de supervisor o encargado de línea como tal; lo que sí es importante es que las tareas asociadas a este puesto sean realizadas y exista un responsable de las mismas. La cuestión básica que debería formularse sería la siguiente:

¿Quién realiza y quién tiene la responsabilidad de la tarea x?

La planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos *("Guías de Planificación")* sería un documento de referencia para el desarrollo de un programa de mantenimiento preventivo realista y comprensivo. La guía básica propuesta del equipo de gestión y sus tareas asociadas sería la siguiente:

a) Nivel operativo.

- ***Capataz o encargado (Foreman o Supervisor).***

Representa un elemento del equipo de gestión en la primera línea de manteni - miento *(front– line).* Las siguientes tareas serían de su responsabilidad:

1. Mandar /dirigir al equipo de mantenimiento.

Deberá ordenar las tareas de mantenimiento asignadas y orientar, asesorar, clari - ficar al equipo aquellas dudas que se le presenten. Debe disponer de experiencia y conocimiento sobre la instalación y los equipos. También será responsable de realizar la asignación de tareas individuales y seguir su evolución.

2 .Controlar que los trabajos son realizados de forma eficiente y segura.

Será responsable de comprobar que cada trabajador dispone de la información, herramientas e instrucciones apropiadas para la ejecución eficiente y segura del trabajo asignado.

3. Informar al planificador de la evolución de la planificación y la programación de los trabajos.

Retroalimentará al responsable del diseño de la planificación y programación del mantenimiento para asegurar que los planes de trabajo propuestos son eficientes y efectivos.

4. Asegurar la calidad de los trabajos.

Será responsabilidad del capataz comprobar que el personal dispone de tiempo suficiente para realizar el trabajo bien a la primera.

5. Asegurar el nivel de disponibilidad de los equipos que garantice los objetivos programados de producción.

6. Coordinarse con los supervisores de operación y producción para que los trabajos de mantenimiento sean realizados de acuerdo con los estándares establecidos.

Si el grupo de operación o producción está realizando trabajos de mantenimiento sobre los equipos, el capataz de mantenimiento tiene la responsabilidad de compro - bar que el trabajo está siendo realmente realizado, está siendo realizado de forma segura y de acuerdo con los estándares apropiados.

7. Verificar el nivel de cualificación del personal y recomendar la formación que considere oportuna en función de la efectividad y eficiencia observada en la ejecución de los trabajos.

8. Hacer cumplir las reglamentaciones en materia de medioambiente.

Tendrá la responsabilidad de asegurar que todos los trabajadores de manteni - miento cumplan con todas las regulaciones medioambientales. Esto incluye asegurar la documentación apropiada, prácticas de trabajo y procedimientos.

9. Cumplir la regla 6/2.

Su obligación será estar en planta resolviendo, orientando y dirigiendo los trabajos de mantenimiento. Como parte principal de sus funciones, será responsa - bilidad del capataz dirigir a los trabajadores de mantenimiento al menos 6 horas al día, con no más de 2 horas dedicadas a reuniones o temas burocráticos (papeles).

10. Asegurar el equilibrio de las cargas de trabajo.

11. Comprobar que se cumplan los acuerdos adoptados en la negociación colectiva para cada colectivo.

12. Asegurar que el CMMS es alimentado correctamente (con datos precisos y completos).

13. Implementar los programas de mantenimiento preventivo y predictivo.

Será responsable de comprobar que el personal está cualificado y dispone de las capacidades y habilidades necesarias para realizar, de forma apropiada, las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo. Tendrá la responsabilidad de proponer mejoras a los programas de preventivo y predictivo (introducción o eliminación de pasos a la hora de ejecutar tareas de preventivo, propuesta de nueva tecnología para las tareas de predictivo, etc.)

- ***Responsable de la Planificación de los trabajos de mantenimiento (Maintenance Planner).***

Mientras el capataz gestiona a los operarios de mantenimiento, el Responsable de la planificación brindará el soporte logístico a los mismos. Es una figura diferente a la anterior. Las responsabilidades típicas serían:

1. Planificar, programar y coordinar las actividades de mantenimiento correc - tivo y preventivo.

Sería la figura responsable de la logística del mantenimiento. La función se desarrollaría sobre la base del estudio y la gestión de los trabajos solicitados (órdenes de trabajo, tareas programadas, otras).Analizaría los trabajos requeridos, definiría los materiales, los desplazamientos, herramientas, repuestos, equipos físicos y humanos necesarios, etc, con objeto de completar los trabajos de forma eficiente y económica. Sería responsable de eliminar los tiempos no productivos (tiempos de preparación y espera: s*hortages time*) y de asegurar que los trabajos de mantenimiento, una vez dispuestos, se ejecuten sin retrasos.

2. Desarrollo semanal de los programas de trabajo y asistir/ayudar al capataz en el establecimiento de prioridades.

Sería responsable de los cambios y ajustes en el programa semanal después de ser revisados con la primera línea de mantenimiento. Por consiguiente, es muy impor - tante una información completa y actualizada del *backlog* de órdenes de trabajo, así como tener claro los *"niveles de criticidad objetivos"*de los equipos y los criterios / reglas de asignación de prioridades (importante, urgente, etc.). Será responsable de or -ganizar (planificar y programar) de forma óptima la ejecución de los trabajos (salidas) solicitados (entradas) en base a la dinámica del momento.

3. Asegurar que los ficheros de datos del CMMS de los equipos y almacenes de la instalación o planta de producción sean completos y estén actualizados.

Desarrollo de códigos estandarizados para los equipos, almacenes y tareas aso - ciadas a todas las actividades de mantenimiento. Será responsable de la custodia del fichero de datos del CMMS y la revisión de la información entrante al CMMS para comprobar su fiabilidad y completitud.

4. En plantas de pequeña dimensión (15 a 20 operarios en mantenimiento) puede ayudar /asistir a las funciones de almacén y compras (emisión de órdenes de com - pras, devoluciones, ajustes y recepción de ítems en almacén).

5. Identificar, analizar y revisar los problemas de mantenimiento con el inge - niero de mantenimiento para la mejora de las operaciones en planta y del rendimiento operativo.

En muchas organizaciones, un error frecuente es asignar al capataz funciones de planificación y programación.

Las dos funciones anteriores se centran en la gestión de la fuerza de trabajo del departamento y en suministrar el soporte necesario para que sea efectiva y eficiente. Si estas dos funciones son asignadas correctamente y completadas, la organización dispondrá de unos medios que la capacitan para obtener/recoger datos a través del sistema de órdenes de trabajo que serían incorporados a los ficheros de datos del CMMS.

El próximo paso será definir la estructura, a nivel organizativo (funcional), que utilice estos datos para la gestión efectiva del mantenimiento y obtener el máximo rendimiento de los activos físicos *(máximización del capital inmovilizado).*

b) Nivel de gestión. Niveles táctico y Estratégico.

- ***Ingeniero de Mantenimiento (Maintenance Engineer).***

Será responsable de maximizar la utilización de los equipos y activos existentes, por lo que la apropiada gestión de los mismos recaerá sobre esta figura. A diferencia del ingeniero de proyecto, el cual se concentra en las nuevas construcciones y nue - vos equipos, la función del ingeniero de mantenimiento se centra en la optimización de lo existente. Sus principales responsabilidades serían:

1. Comprobar que el equipo, bajo la filosofía de Ciclo de Vida, está correcta - mente diseñado, seleccionado e instalado.

Sin datos, los departamentos de compra y contabilidad tomarán decisiones de compra que pueden resultar poco rentables a medio/largo plazo. Luego, disponer de un buen fichero de datos de costes de mantenimiento es muy importante.

2. Asegurar que los equipos estén funcionando de forma efectiva y eficiente.

Esta tarea es diferente a la correspondiente al seguimiento del *uptime*, parámetro frecuentemente utilizado en los objetivos de mantenimiento. Se trata de responsabi - lizarse de un objetivo más amplio que aune los intereses de producción y manteni - miento; consiste en que los equipos, cuando estén operativos, estén funcionando a las

velocidades y capacidades de diseño con objeto de brindar un mejor rendimiento operativo. Desde esta óptica, entender los conceptos de capacidad y velocidad de di - seño resulta más importante que medir el *uptime.*

3. Definir las técnicas y programas apropiados para el "condition monitoring" en equipos críticos.

La información obtenida sería traslada al responsable de la planificación para que pueda planificar y programar, de forma efectiva, el mantenimiento a nivel global. Estas técnicas deben contribuir a eliminar las paradas (downtime no planificado) por mantenimientos no planificados.

4. Revisar las deficiencias observadas durante el mantenimiento correctivo y buscar soluciones.

5. Suministrar directrices técnicas para el CMMS.

El ingeniero de mantenimiento también revisará los datos del CMMS y propon - drá recomendaciones sobre:

- los tipos y la cantidad de datos que deben ser recogidos
- los códigos de acciones, problemas, causas que le faciliten el seguimiento apro - piado de las acciones de mantenimiento.

6. Revisar y aconsejar sobre las políticas de stoks de repuestos (uso y disposición), alquiler de equipos, etc.

7. Promover y establecer criterios para la estandarización de equipos con objeto de reducir el número de ítems de repuesto, la formación necesaria y el presupuesto total de mantenimiento.

Para el proyecto de estandarización son importantes los datos suministrados a nivel de supervisor y responsable de planificación.

8. Consultar problemas técnicos sobre equipos o procedimientos de trabajo con los operarios de mantenimiento y elaborar propuestas de solución o rediseño.

9. Conocer los avances en nuevas tecnologías y herramientas en mantenimiento.

10. Asegurar que todos los contratistas externos estén cualificados y que los trabajos realizados cumplan las especificaciones de calidad.

11. Desarrollar estándares para la revisión del mantenimiento principal (mayor) y las interrupciones.

Deberá plantear aquellas recomendaciones que considere necesarias para que se introduzcan los ajustes pertinentes en la planificación y la programación de los tra - bajos.

12. Realizar un análisis periódico coste – beneficio de los programas de mante - nimiento.

Periódicamente deberá realizar una revisión de los programas asociados a su área de responsabilidad y determinar si el trabajo debe ser realizado por el operador, personal de mantenimiento o personal subcontratado. Además, revisará qué trabajos necesitan ser realizados, cuáles deben ser eliminados y qué nuevos trabajos necesitan ser identificados e incorporados al plan de mantenimiento.

13. Suministrar orientación técnica para elaborar y actualizar los programas de mantenimiento correctivo y preventivo y comprobar que se están aplicando las herramientas y las tecnologías apropiadas.

14. Hacer seguimiento de los programas de mantenimiento de la competencia.

Será responsable de recopilar información de las actividades realizadas por la competencia para la gestión del mantenimiento; el objetivo será obtener ideas de potenciales mejoras a introducir en los programas propios.

15. Establecer los indicadores de funcionamiento (PI´s) para la gestión del mantenimiento.

Será responsable de desarrollar los *Indicadores de Funcionamiento* y de revisar - los con el director de mantenimiento para su validación.

16. Optimizar las estrategias de mantenimiento de forma dinámica.

17. Analizar los datos de operación de los equipos.

Debe asegurar que los parámetros de operación de los equipos estén lo más próximo posible a los de diseño (velocidad, capacidad, etc.) con objeto de garantizar el rendimiento óptimo de operación y producción.

- ***Director de Mantenimiento (Maintenance Manager).***

Tendrá la responsabilidad de gestión de toda la función mantenimiento para la compañía. Sus principales tareas serían:

1. Responsabilizarse de la función de mantenimiento, incluyendo planificación, supervisión y staff de ingeniería.

Esta estructura permite definir un único punto donde centrar la responsabilidad del programa global de mantenimiento.

2. Coordinar las actuaciones con los directores de producción/operación, de proyecto/construcción, de compras, administración con objeto de garantizar el alineamiento de los objetivos corporativos y la optimización global de los activos/re-cursos de la organización.

3. "Adoctrinar" sobre los beneficios de la función mantenimiento a otras funcio - nes de la organización.

Deberá fomentar la creación de una *"cultura corporativa del mantenimiento"* mediante la armonización de criterios con las funciones vinculadas (operación/fa - bricación, compras, mantenimiento, etc.). El objetivo debe ser la creación de un amplio banco de conocimiento que represente la base de la "ingeniería del mantenimiento en la organización".

4. Asegurar que todo el personal de mantenimiento (supervisores, responsable de planificación, ingenieros, técnicos, operarios) está correctamente educado y formado.

Esta tarea/responsabilidad es una de las más descuidadas por parte de la dirección. Sin embargo, la tecnología está en constante evolución y los conocimientos y habilidades deben ser constantemente actualizados para un correcto cumplimiento de las responsabilidades asignadas y la adaptación a las demandas del mercado.

5. Responsabilizarse de la administración y cumplimiento del presupuesto asignado así como de toda la logística y actividades del personal para la organi - zación del mantenimiento (planificación, control de costes, planificación de vaca - ciones,…).

6. Asignación de funciones dentro del departamento. Definición y asignación de los puestos de trabajo.

ANEXO III

GUÍA BÁSICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN MANTENIMIENTO.
MARCO PARA EL ANÁLISIS DE LAS TAREAS DE MANTENI MIENTO, LA DEFINICIÓN Y DISEÑO ÓPTIMO DE L PLAN DE MANTENIMIENTO PARA LA STM(I), LA DETERMINACIÓN DE SU COSTE Y RDC.

GUÍA BÁSICA PARA LA PLANIFICACIÓN DE LA FUNCIÓN MANTENIMIENTO.

Hay diferentes formas de reducir la frecuencia de fallo (aseguramiento del estado), una de las cuales es a través del mantenimiento. En este trabajo de tesis se enfoca el mantenimiento como una función de negocio; como tal función, será necesario priorizar las actividades en términos de ROI (ROI_M), aspecto que es ignorado en la literatura académica sobre mantenimiento (Tam, A.S.B. & Price, J.W.H., 2008b). Ello justifica la importancia de un diseño adaptado a los objetivos empresariales para la eficacia en la gestión de la estrategia y política de O&M.

1. MANTENIMIENTO VS. GESTIÓN DE RIESGOS. MARCO PARA LA DEFINICIÓN Y DISEÑO ÓPTIMO DEL PLAN DE MANTENIMIENTO, DETERMINACIÓN DEL COSTE DE MANTENIMIENTO Y EL RDC.

La función mantenimiento tiene una influencia importante en la gestión de riesgos, y por tanto, en la rentabilidad económica del sistema técnico (Coetzee, J.L., 2000/1). De forma general, la función mantenimiento "hereda" un perfil de riesgo desde la fase de diseño (ingeniería) que ha de gestionar en base a las siguientes restricciones básicas: restricciones formuladas por producción (a través de la estrategia de operación), limitaciones presupuestarias y de tiempo.

1.1. Riesgo de mantenimiento. Definición. Cálculo de RDC.

Se define como la contribución, o no, a la consecución de los objetivos de producción de la estrategia de mantenimiento seleccionada (Coetzee, J.L., 2000/1). Se suele medir en términos como downtime, % de indisponibilidad, pérdida de unidades de producción, aumento de los costes de mantenimiento. Las diferentes clases de riesgo de mantenimiento son:

Consecuencia de riesgo Factor 1: Seguridad
Consecuencia de riesgo Factor 2: Pérdida de producción
Consecuencia de riesgo Factor 3: Pérdida de calidad
Consecuencia de riesgo Factor 4: Efectos medioambientales
Consecuencia de riesgo Factor 5: Coste de mantenimiento.

El riesgo se expresa en unidades monetarias y se calcula, para cada factor de riesgo específico (i = 1...5), a través de la siguiente expresión:

$$R_i = P_i \; X \; C_i \; \textit{(en udes. monetarias)} \quad \textbf{(45)}$$

R_i = Riesgo atribuido a la consecuencia de riesgo Factor i^{th}
P_i = Probabilidad de ocurrencia del riesgo Factor i^{th}
C_i = Consecuencia de ocurrencia del riesgo Factor i^{th} (en udes. monetarias)

El riesgo total para una situación particular de mantenimiento (K^{th}) sería:

$$\textit{Coste de la dimensión riesgo (RDC):} \quad R_k = \sum_{i=1}^{5} R_i = \sum_{i=1}^{5} (P_i \; x \; C_i) \quad \textbf{(46)}$$

El riesgo R_k para diferentes situaciones de mantenimiento es representado a través de la curva de riesgo (perfil de riesgo):

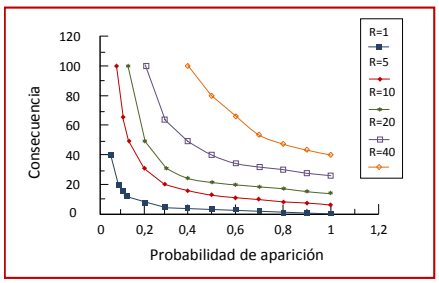


Figura139: Perfil de riesgo (Coetzee, J.L., 2000/1).

Las curvas representan diferentes situaciones de mantenimiento con niveles de riesgo total de mantenimiento constante (curvas de iso-riesgo de mantenimiento).

Para obtener altos niveles de prevención del fallo (aseguramiento del estado) es necesario una apropiada gestión de los riesgos de mantenimiento.

1.2. Modos de reducción del riesgo. Base para la determinación del coste del mantenimiento y el RDC.

Como indican las figuras siguientes, el riesgo es creciente (figura 140). Para mejorar el riesgo de mantenimiento y reducir el riesgo medio (figura 141) es necesario tomar decisiones de diseño (a priori) o gestión (a posteriori). Son posibles tres líneas de actuación (figura 142):

1. La situación ideal: actuación tendente a reducir simultáneamente ambos factores (flecha A. Dirección hacia el origen).
2. Actuaciones orientadas a reducir las consecuencias de cada punto de riesgo Individual (flecha C). Aunque ello suponga una mayor probabilidad de ocurrencia, podría ser amortiguada por un aumento del beneficio.
3. Actuaciones orientadas a reducir la probabilidad de ocurrencia de cada punto de riesgo individual (flecha B). Esta tercera opción tendría un beneficio sobre el riesgo total. Sin embargo, la baja predictibilidad (debido a la pérdida de datos estadísticos por la reducción de la frecuencia de ocurrencia) podría generar una situación de riesgo de baja probabilidad de ocurrencia pero de incalculables consecuencias.

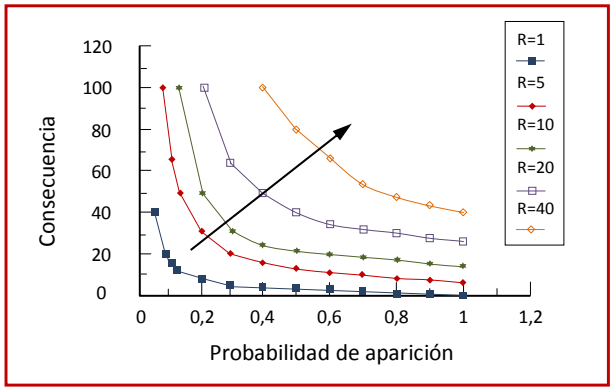


Figura 140: Dirección de crecimiento del riesgo (Coetzee, J.L., 2000/1).

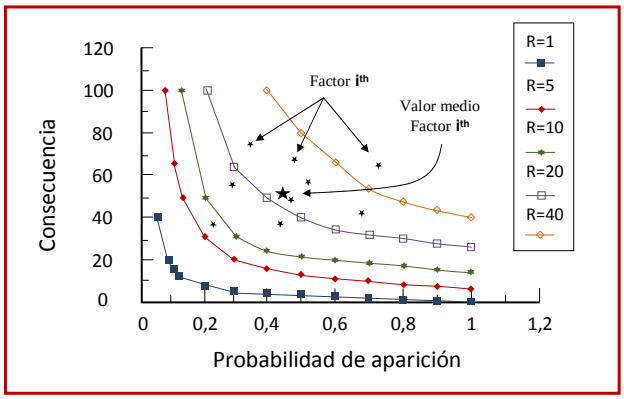


Figura 141: Riesgo medio (Coetzee, J.L., 2000/1).

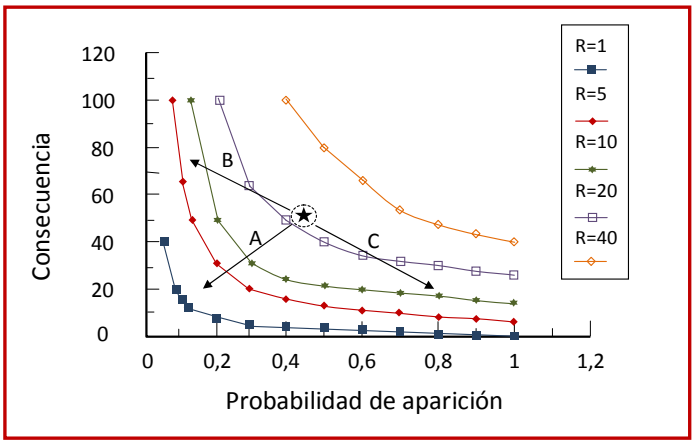


Figura 142: Direcciones de actuación para la reducción del riesgo (Coetzee, J.L., 2000/1).

Como base para discutir los procesos de reducción del riesgo es importante tener en cuenta el Ciclo del Mantenimiento (modelo descriptivo que explica los procesos internos típicos de la organización del mantenimiento). En el se distinguen dos nive - les:

- *El ciclo estratégico* (parte exterior del ciclo), donde se establecen las directrices para la dirección y los procesos de medida para el control .
- *El operativo o de servicio* (parte interior). Está formado por el Plan de Mantenimiento y las operaciones de mantenimiento.

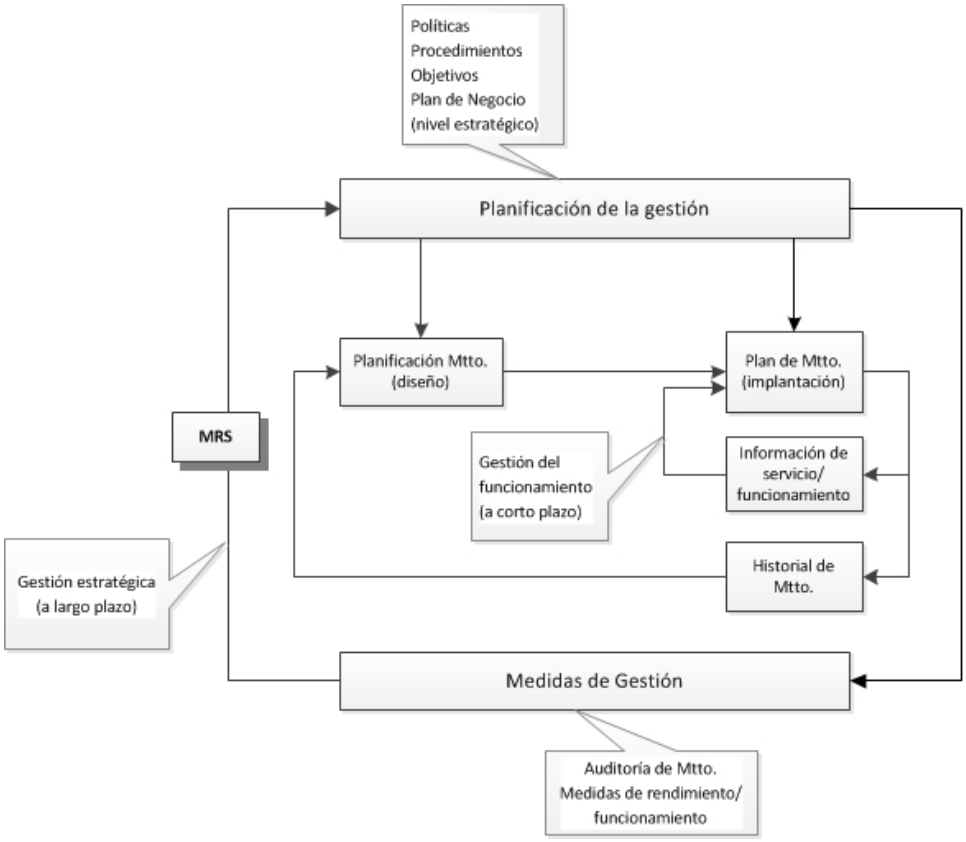


Figura 143: Ciclo de Mantenimiento (Esquema simplificado) (Coetzee, J.L., 2000/1).

En base al Ciclo de mantenimiento, las principales formas de reducir el riesgo serían:

- ***Una reducción general*** a través de una práctica apropiada de la gestión del mantenimiento. Ello supone definir y disponer la siguiente estructura:

• Política de mantenimiento/procedimientos.
• Plan de negocio del mantenimiento.
• Procesos de medida.
• Plan de mantenimiento.
• Planificación del plan (Principios de administración del mantenimiento y procedimientos).
• Sistemas (definir y disponer los sistemas necesarios para el funcionamiento de la estructura, dentro de los cuales estaría el CMMS como parte del mismo).
• Diseño y plan de desarrollo de la fuerza de trabajo. Esta sería una de las herramientas claves del éxito en la fase de operación.
• Gestión de la excelencia. Planificación y desarrollo de buenas prácticas.

- ***Una reducción específica*** a través de una apropiada gestión de los principales contribuyentes de riesgos . Las técnicas utilizadas serían las conocidas en los estudios de mejora en ingeniería: estudio de diseño, análisis de fallo, investigación del fallo, ingeniería del valor,...

Esta última opción sería la más activa porque, a pesar de que la existencia de una estructura de gestión es fundamental, el riesgo no desaparece por sí mismo si no existe una gestión dinámica de los principales contribuyentes. La situación ideal vendría dada por una combinación equilibrada de ambas opciones.

La complejidad de la función mantenimiento obliga, con objeto de brindar la máxima contribución a los objetivos del negocio, que la organización se diseñe sobre un enfoque holístico donde se contemplen todas las partes críticas al mismo tiempo.

La figura 144 muestra varias de las principales áreas del ciclo de mantenimiento y la dependencia de una sobre otras:

Figura 144: Orden de implementación.

El área de ejecución de trabajos (base de la pirámide) es considerada por muchos el corazón del mantenimiento. Sin embargo, su eficiencia y efectividad vendrá condicionada por las capas superiores. Una de las más importantes (la fundacional) es la cúspide de la pirámide, donde se define la política que dicta los procedimientos a los cuales ha de subordinarse la planificación del mantenimiento. Por tanto, la solución no pasa por la implantación de soluciones locales altamente sofisticadas sino por un enfoque holístico e iterado que brinde una organización de *la función*

acompasada con los objetivos del negocio. Se trataría de aplicar una variedad de técnicas, debidamente seleccionadas, a pequeñas partes (pero con visión global) para tratar riesgos innecesarios e ir ascendiendo, de forma progresiva y manejable, en vez de una única técnica a toda la organización.

2. ANÁLISIS DE RIESGO: PRA (PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT). DETERMINACIÓN DEL RPN - TEÓRICO.

El análisis de riesgo es un punto importante para reducir los niveles de incertidumbre de una decisión. Para que un problema de análisis de riesgo resulte manejable es fundamental definir claramente los objetivos, los cuales pueden especificarse en términos de disponibilidad, fiabilidad, seguridad (operacional, medioambiental,...), financieros, etc.

El riesgo se define como la terna formada por los siguientes elementos:

$$Riesgo = R\,(escenarios,\ probabilidad\ de\ ocurrencia,\ sus\ consecuencias) = \quad \textbf{(47)}$$

$$R_i\,(E_i\,, P_i\,, C_i)\,,\ \ i = 1...n.$$

Estos tres factores determinan el Perfil de Riesgo y/o la Curva de Riesgo.

En el análisis de riesgos se abordan básicamente dos problemas:

- Identificar y comprender, de forma pormenorizada, los riesgos/peligros potenciales asociados a una solución/decisión (Evaluación/valoración).
- Conocer cómo gestionar las consecuencias asociadas a cada escenario probable (Gestión).

Por tanto, en el análisis de riesgos es importante distinguir dos fases bien diferenciadas:

(a) La fase de Valoración /evaluación. Chequea el logro de los objetivos. Establece el perfil de distribución probabilidad – consecuencia para una situación dada/escenario (perfil de riesgo). En esta primera fase, lo que se busca es la identificación de los acontecimientos, casos, etc. y la construcción de las curvas de riesgos. La metodología más utilizada para el análisis cuantitativo del riesgo es la PRA. Suele estar soportada por técnicas como el análisis preliminar de riesgos, FMEA, análisis de criticidad, estudios de operatividad y riesgos, análisis de árbol de casos/sucesos, análisis de árbol de fallos.

Fundamentalmente, en esta primera fase, se busca dar respuesta a las siguientes tres cuestiones:

i. *¿Qué puede suceder?*
ii. *¿Cuál es la probabilidad de que suceda?*
iii. *¿Cuáles son los efectos y consecuencias?*

Los escenarios planteados serán función del contexto. Pueden incluir peligros no deseados (riesgos químicos, térmicos, mecánicos, eléctricos, radiactivos) u otro tipo de riesgos, como podrían ser: los financieros, reputacionales, de operación.

(b) La fase de Gestión. Busca satisfacer los objetivos. En esta segunda fase se proponen las alternativas, se evalúan (para cada alternativa) las curvas de riesgo, se eligen las alternativas coste-efectivas para el control de riesgos y se definen los cursos de acciones correctivas. Es importante remarcar que las alternativas se definen en base a los siguientes criterios:

- *Minimizar la probabilidad de ocurrencia.*
- *Reducir el impacto de las consecuencias.*
- *Transferir el riesgo (por ejemplo vía póliza de seguro, otros).*

Esta segunda fase se corresponde con la toma de decisiones en base a los trade-off entre los costes de las alternativas, los riesgos y las curvas de riesgos. A menudo se toma una alternativa libre de riesgo para realizar la evaluación de las alternativas.

La fase de valoración es una fase más técnica, formal, cuantitativa y objetiva que la fase de gestión. Esta última es más heurística, cualitativa y subjetiva en base a criterios sociales y políticos.

El nivel de detalle del análisis se corresponderá, lógicamente, con la magnitud del riesgo a evaluar y los costes asociados a su gestión.

Los standards aplicables a los procesos de evaluación de riesgos son:

(a) ISO 17776: 2000 Guidelines on tools and techniques for hazard identification and risk assessment.

(b) ISO 13702: 1999 Control and mitigation of fires and explosions on offshore production installations.

(c) 21 CFR1910.119. Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals-Compliance Guidelines and Enforcement Procedures-U.S.Departament of Labor, Occupational Health and Safety Administration.

Este estándar requiere realizar un PHA (Preliminary Hazard Analysis) de todos los procesos que cumplan con los criterios especificados (http:// www. healthsafetyinfo. com/articles/29cfr1910 -119.htm).

(d) CAN/CSA-Q850-97 (October 1997). Risk Management: Guideline for Decision-Makers, a National Standard for Canada.

(e) Australian Standard 4360:1995. Risk Management and s22 of the Workplace Health and Safety Act 1995.

(f) Australian Standard AS/NZS 4360:1999. Risk Management.

(g) British Standard BS 6079-3:2000.Project Management, Part 3: Guide to the Management of Business Related Project Risk.

(h) Japanese Standard JIS Q 2001:2001- Guidelines for the development and imple - mentation of a risk management system.

Varias son las técnicas o procesos que se pueden utilizar para identificar y valorar/evaluar los riesgos. Unas complementarias de otras en función del sistema en estudio.

2.1. PRA (Probabilistic Risk Assessment).

Esta metodología se utiliza para la valoración cuantitativa de un perfil/curva de riesgo asociada a una situación dada. Consta de las siguientes fases (Schram, G., 2003a):

- *Definición de la metodología a utilizar. Mapa de carreteras del análisis.*

El primer paso del PRA supone una revisión de los objetivos o análisis de riesgo y un inventario de posibles técnicas y recursos (información/expertos).

- *Recopilación de información.*

En este paso se realiza la recopilación de todo el conocimiento disponible sobre el sistema o proceso a analizar (Control administrativo, mantenimiento, procedi - mientos, sistemas de protección, identificación de los principales sistemas o métodos de emergencia y seguridad, interacciones físicas entre los principales sistemas,...).

Como salida de este paso debe quedar configurado un sistema de clasificación de la información que garantice la calidad del PRA.

- *Identificación de los "inductores de sucesos" (Initiating Events).*

Básicamente, en este punto lo que se trata es de identificar las causas que desen - cadenan situaciones no deseadas o peligros. Se trata de identificar problemas poten -

ciales que pueden ser evitados en una fase temprana (durante el diseño o instalación de una nueva planta o proceso o la introducción de modificaciones a una existente) con objeto de evitar realizar, a posteriori, costosas modificaciones. Dos son las formas de realizar el estudio:

(a) Evaluación técnica (a nivel de ingeniería). Parte del estudio de la información disponible sobre valoración de riesgo, históricos de operación, datos específicos de diseño de planta, standards industriales, etc.

(b) Enfoque más formal. Este incluiría un checklist previo del marco regulatorio aplicable; las técnicas utilizadas son básicamente de tipo cualitativo y son aplicadas por un equipo experimentado y multidisciplinar: PHA (Preliminary Hazard Analysis); FMEA; estudio de criticidad; en industrias del sector químico, un estudio de opera - tividad y riesgos (HAZOP: Hazards and Operability Study); JHA(Job Hazard Analy - sis); en el sector de alimentación, un HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point), etc.

***** *Otros análisis:* dependiendo del sector de actividad será necesario realizar otros análisis; por ejemplo:

- *SIL (Safety Integrity Level Analysis).*

Determinación de los dispositivos de protección y definición de la frecuencia de inspección en base a la condición "¿Qué sucede si el dispositivo falla?"

En conformidad con IEC 61508, el SIL se diseña en base a instrumentos para la protección del sistema (http://www.iec.ch).

- *EIL (Enviromental Integrity Level Analysis).*

Determinación de los dispositivos de protección y definición de la frecuencia de inspección en base a reducir los riesgos vinculados a los peligros asociados a fugas, derrames, emisiones, etc.

Los enfoques no son excluyentes.

- *Análisis de criticidad.*

Se realiza después del FMEA. Clasifica los modos de fallo potenciales de acuerdo a la combinación severidad – probabilidad de ocurrencia. Una forma de valorar la criticidad del equipo es estimando los costes del efecto del modo potencial de fallo.

- *Desarrollo de escenarios. ETA (Event- Tree Analysis).*
- *Análisis del sistema. FTA (Fault- Tree Analysis).*
- *Valoración/cuantificación.* El procedimiento sería :

1.- Determinar la frecuencia de los escenarios y la incertidumbre en el cálculo.

Se cuantifican las secuencias definidas en los ETA y FTA. Se utiliza un proceso de reducción para obtener una representación simple para cada secuencia de sucesos.

2.- Cálculo de la frecuencia total de cada secuencia.

En la práctica es necesario analizar una gran cantidad de ítems y secuencias posibles, por lo que es necesario recurrir a técnicas de truncamiento.

El PRA nos brinda la lista de escenarios de riesgos, incluyendo sus resultados y probabilidades. El siguiente paso es la determinación de las consecuencias aso - ciadas a cada escenario.

2.2. Determinación del RPN-teórico.

Cada modo de fallo lleva asociado un/os efecto/s potencial/es, y algunos son más probable que ocurran que otros. El riesgo relativo de un modo de fallo y sus efectos es calificado en base a tres factores:

1. *Severidad:* valora las consecuencias de un fallo, si este ocurriera.
2. *Ocurrencia:* probabilidad o frecuencia de un fallo.
3. *Detección:* probabilidad de detectar un fallo antes de que su impacto se pro - duzca.

Cada de uno de estos factores es valorado en una escala de 1 a 10 (de bajo a alto). El producto del valor asignado a cada uno de los tres factores es lo que determina el *RPN (Risk Priority Number)* (Barrat, M., 2004):

$$\text{Risk Priority Number (RPN)} = \text{Severidad (S)} \times \text{Ocurrencia(O)} \times \text{Detección(D)} \quad \textbf{(48)}$$

Este número es valorado en una escala de 1 a 1000. Es utilizado para graduar, y estimar a priori *(RPN - teórico)*, la necesidad de acciones correctivas y preventivas. Una vez las acciones son ejecutadas, se puede volver a evaluar los factores de severidad, ocurrencia y detección para obtener el *RPN ajustado* a la nueva situación, sirviendo como indicador de la efectividad de las acciones de mantenimiento realizadas.

Para determinar los modos de fallo y realizar el análisis de efectos se utiliza un procedimiento sistemático conocido, por sus siglas en inglés, como método *FMEA (Failure Mode and Effects Analysis).* Se centra en la identificación y prevención de defectos contribuyendo a la mejora de la seguridad y la satisfacción del cliente. Este método debería ser aplicado también en las etapas iniciales de diseño y desarrollo de un producto o proceso. Los pasos para su aplicación serían:

1. *Definición del sistema y subsistemas.*
2. *Definir/analizar todas las funciones del sistema.*
3. *Listar los modos potenciales de fallo.*
4. *Listar los efectos potenciales para cada modo de fallo.*
5. *Listar las causas de fallo.*
6. *Listar los controles (o controles actuales, si el sistema ya existe)*
7. *Valorar/cuantificar los parámetros de severidad, ocurrencia y detección para cada modo de fallo .*
8. *Calcular el RPN.*
9. *Definir el programa de acciones para reducir o eliminar el RPN.*
10. *Establecer el/los sistema/s de monitorización para revisar los resultados y poder establecer las medidas correctoras oportunas (Soporte a la toma de decisiones).*

Una correcta aplicación de esta filosofía enfocada al ciclo de vida del sistema (ingeniería concurrente) optimizaría las políticas de mantenimiento en el *Nivel 2 (Mantenimiento en la fase de operación).* Una vez el sistema está en producción / operación las tareas de mantenimiento se centran en la planificación y la progra - mación.

3. COSTE DEL DOWNTIME.

La competitividad está haciendo bascular el orden de importancia hacia el aseguramiento del estado. De esta forma, la Función Mantenimiento debería dar respuesta en los tres niveles que garantizan la competitividad:

1. En el nivel inicial de inversión, con exigencias de diseño, construcción y montaje.

2. En los costes operativos y de funcionamiento, a través de la política/estra - tegia de mantenimiento seleccionada.

3. A nivel de facturación, según la capacidad que presente continuamente para garantizar el estado del sistema/equipo.

El downtime juega un papel relevante en muchas áreas y decisiones de gestión, y de un modo particular, en la planificación de la función mantenimiento. Representa un factor de coste. Por tanto, resulta importante el establecimiento de un método sistemático que permita, en diferentes situaciones, la determinación de su coste.

3.1. Factores de costes relacionados con el mantenimiento. Costes directos e indirectos del mantenimiento.

En general, la razón fundamental del mantenimiento está relacionada con la reducción de las consecuencias del fallo, por lo que los aspectos económicos juegan un papel importante en la planificación de esta función. Generalmente, los costes asociados a la pérdida de producción son considerados como la consecuencia dominante. Por tanto, para la optimización de la función resulta fundamental un modelo adecuado que permita determinar con rigor la relación gasto en mantenimiento vs. coste de mantenimiento (pérdidas de producción, costes de riesgo,...) para poder establecer con precisión los trade –off .

El ROI_ M puede ser evaluado en base a la reducción del coste de la dimensión riesgo.

El criterio para priorizar las alternativas será el de asegurar el máximo retorno en el gasto en mantenimiento en forma de reducción de riesgo bajo las restricciones contempladas. Por tanto, es importante una buena comprensión de la relación coste del riesgo v.s. gasto en recursos para cada alternativa. Ello exige un modelo que posibilite un análisis exhaustivo de alternativas y permita evaluar y comprender sus estructuras de costes.

3.1.-1. Definiciones.

Dada la gran diversidad de interpretaciones de muchos términos en manteni - miento se recogen algunas definiciones que se consideran claves para el modelo desarrollado en este trabajo (Geraerds, W.M.J., 1985):

- Instalación: es el conjunto de activos seleccionados para realizar el proceso de transformación/producción.
- Unidad de producción. Activo físico que realiza una función relevante en el proceso de producción: torno, alto horno, WEC,...
- Componente. Parte de la unidad de producción que no puede ser dividida sin perder su identidad.
- Montaje (Assembly): conjunto de componentes interrelacionados que como característica del diseño de la unidad de producción pueden ser reemplazados como un todo.
- Pieza de repuesto (spare part): es un assembly o componente en stock para mantenimiento.
- Fallo: estado físico en la que un componente no puede continuar cumpliendo con la función asignada. Se define como una interrupción de la capacidad funcional o disminución del rendimiento por debajo de un umbral establecido en las especificaciones funcionales. Las consecuencias del fallo pueden ser tanto financieras como no financieras (pérdida de tiempo de producción, satisfacción del cliente, incumplimiento de garantías, penalizaciones legales, etc.).

El coeficiente de fallo de un sistema viene dado por el Mean Time Between Failure (MTBF).

- Defecto (fallo absoluto): fallo que inhabilita, de forma absoluta, la capacidad de operar. La frontera entre un fallo y un defecto es el boundary failure (límite de fallo).
- Fallo primario: es un fallo no causado por otro fallo.
- Fallo secundario: es un fallo causado por otro fallo.
- Avería (Breakdown): suceso que deja *inoperativa* la unidad de producción debido a un fallo absoluto.
- Parada (shutdown): evento que deja *indisponible* la unidad de producción como resultado de una decisión de mantenimiento.
- Downtime. Es la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo represen – tativo (normalmente el tiempo de producción teórico), para los cuales una unidad de producción no está operativa debido a tareas de mantenimiento. Se puede distinguir entre el downtime planificado y el no planificado.
- Factor de Planificación (Planning Factor: PF). Se utiliza para medir la utilización de la instalación en el tiempo de producción teórico. Se puede calcular a través de la expresión (5). De la expresión se observa que el P.F. puede ser alterado por un suceso no planificado, como por ejemplo, un fallo de suministro de materia prima, una huelga, un cambio de regulación.
- Tiempo de producción disponible (uptime). Es el tiempo en el cual la produ - cción puede ser planificada. Vendría representado por la suma de los tiempos, sobre un periodo de tiempo representativo (normalmente el tiempo de producción teórico) para los cuales una unidad de producción está operativa.
- Factor de utilización. Para una unidad de producción representa el % de utilización del uptime.
- Disponibilidad (Availability). Propiedad que cuantifica la parte de uptime de una unidad de producción.
- Tiempo de producción teórico. Es una constante de tiempo; viene represen - tada por el tiempo máximo (horas/día)) disponible para el ciclo de vida planificado. Vendría expresada por la suma del uptime y el downtime total.
- Mantenimiento. Representa, según Martorell, et al., el conjunto de activida - des realizadas sobre un equipo con objeto de evaluar, conservar o restaurar su capacidad operativa. Aunque un equipo esté sometido a mantenimiento (correctivo y preventivo) este puede degradarse con el tiempo en función de las condiciones de trabajo y la efectividad del mantenimiento planificado (mantenimiento imperfecto).

3.1.-2. Optimización de los costes de mantenimiento. Marco general.

Básicamente, las consecuencias del fallo se manifiestan de dos formas:

- En forma indirecta o daño, con respecto a la unidad de producción y su entorno.
- En forma de downtime, con respecto a la función de producción. La ejecu – ción de una tarea de mantenimiento requiere, generalmente, de un tiempo en el que se necesita que la unidad de producción no esté operativa; ello se traduce, directamente, en una pérdida económica asociada a la pérdida de producción. Indirectamente, el downtime puede influir en los costes indirectos (imagen de la empresa por incumplimiento de los plazos de entrega, calidad del producto, etc.).

Se distinguen dos tipos de costes asociados a las consecuencias:

- Costes indirectos (damage cost).
- Costes directos del mantenimiento (downtime).

(a) Costes asociados al daño (damage cost).

Son costes indirectos que también se pueden definir como "costes de indisponi - bilidad": gastos derivados de las pérdidas de producción, rendimiento y calidad, pérdida de imagen, daños ocasionados a la seguridad y medio ambiente por averías, costes diferidos de producción, penalizaciones contractuales, multas, etc. Son básicamente los costes vinculados a:

- Acciones de CM (Mantenimiento Correctivo) para restaurar la unidad de produ - ción al estado considerado necesario.
- Acciones de correctivo para restaurar el entorno (medioambiente) al estado indi - cado. Las penalizaciones, multas, etc., se añadirían a este término.
- Acciones de preventivo (PM) o medidas correctoras.

El coste total de mantenimiento se puede obtener, según se considere PM o no, a través de las siguientes expresiones:

- *Sólo correctivo (CM).*

$$C_t\, M(CM) = CMO(CM) + CR(CM) + CG(CM) + \textbf{(penalizaciones)}\ , \qquad \textbf{(49)}$$

C_t M(CM): Coste total de mantenimiento, si sólo se aplica correctivo
CMO(CM): Coste total de mano de obra, si sólo se aplica correctivo
CR(CM): Coste total de piezas de repuesto, si sólo se aplica correctivo
CG(CM): Proporción/cuota de los costes de administración y gestión del manteni - miento, si sólo se aplica correctivo.
***(penalizaciones)**: Efectos económicos diferidos (multas, sanciones administrativas, otras) x probabilidad de ocurrencia.*

- *Correctivo y preventivo (CM +PM).*

$$C_t\, M(CM + PM) = C_t\, M(CM^* / PM) + C_t\, M(PM) + \textbf{(penalizaciones)}^*, \qquad \textbf{(50)}$$

$C_t M(CM^*+PM)$: Coste total de mantenimiento, si se introduce mantenimiento preventivo. Este coste dependerá del nivel y calidad del preventivo.
C_t $M(CM^*/PM)$: Coste total de mantenimiento correctivo, función del mantenimiento preventivo seleccionado.
C_t M(PM): Coste total de mantenimiento preventivo.
***(penalizaciones)***: Probabilidad de ocurrencia x consecuencias(€), para la combi - nación CM+PM seleccionada .*

Las expresiones de las componentes de *(49)* serían, en base a lo establecido en *(48)* y bajo un enfoque basado en el riesgo:

$$C_t\, M(\, CM^* / PM) = CMO(CM^*/PM) + CR(CM^*/PM) + CG(CM^*/PM) \qquad \textbf{(51)}$$

$$C_t\, M(PM) = CMO(PM) + CR(PM) + CG(PM) + \boldsymbol{CR^*} \qquad \textbf{(52)}$$

***CR*:** coste del riesgo asociado al plan de preventivo*

(b) Costes del downtime.

También se puede definir como el "coste de disponibilidad" o evitación del daño. El downtime es un componente significativo de coste en las industrias, y de modo especial, en las de proceso continuo. La atención debe centrarse en la definición de

la estrategia de O&M que minimice el downtime y maximice la "disponibilidad técnica" por su influencia directa y positiva sobre los ingresos y el beneficio.

El mantenimiento introduce un efecto negativo, llamado efecto downtime, el cual viene representado por el tiempo que el equipo está fuera de servicio por mantenimiento (correctivo, preventivo sistemático, overhaul, etc.). Este tiempo depende de las características de mantenibilidad del equipo, las cuales son función no sólo de sus características físicas, sino también, de múltiples factores relacionados con el diseño, y en ocasiones, de las condiciones de entorno: stock económico, experiencia y cualificación del personal, accesos, condiciones climáticas,etc. La mantenibilidad es representada por el Mean Time To Repair (MTTR); representa el downtime, en unidades de tiempo, asociado al mantenimiento realizado.

El problema de minimización del downtime es complejo dado que depende de muchos factores (velocidad de diagnóstico, cadena de suministro de repuestos, capa - cidad, preparación y experiencia del equipo de mantenimiento, condiciones ambientales, otros). Por tanto, sería interesante la planificación coordinada del mantenimiento y su soporte logístico en la fase conceptual (preliminar) del diseño.

Un objetivo podría ser mantener un nivel óptimo de fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo. Sin embargo, la mantenibilidad y la disponibilidad suelen tener efectos opuestos.

Las paradas planificadas (recogidas en el P.F.) están en la frontera entre la ingeniería y la fase de planificación de la O&M. Ello da la posibilidad de reducir las pérdidas asociadas a las mismas a través de un buen diseño y una acertada definición de la estrategia de O&M.

Las expresiones **(6)** y **(7)** muestran el efecto de las pérdidas sobre el tiempo de producción teórico y el tiempo de producción disponible.

La expresión **(6)** muestra que el *Tiempo de producción Teórico* se ve afectado por las denominadas *Pérdidas externas*. Estas pérdidas tienen gran importancia a nivel estratégico, y por tanto, para la Alta dirección. Han de ser examinadas con rigurosidad y nivel de detalle pues las decisiones orientadas a su reducción influyen directa y positivamente en el nivel de ingresos y los beneficios.

Las pérdidas externas sólo pueden ser planificadas parcialmente (ejemplo: man - tenimiento programado).

Es importante hacer notar que no todas las pérdidas externas son pérdidas por paradas (downtime losses). También pueden aparecer pérdidas de calidad debidas a causas externas inducidas, por ejemplo, por la elección de un mal proveedor; este tipo de causa puede generar no sólo pérdidas económicos sino también de imagen.

El *Tiempo de producción Disponible* es responsabilidad de producción y manteni - miento. Se verá afectado, según la expresión **(7),** por las denominadas "pérdidas técnicas" (pérdidas causadas por los procesos o malfuncionamiento de las máqui - nas). Una clase de este tipo de pérdidas son las que se denominan "paradas no planificadas" (Unplanned downtime), en las que la causa principal es el fallo (de misión o de demanda).

La disponibilidad de un equipo, en general, viene representada por su capacidad de estar en estado para funcionar bajo unas condiciones especificadas sin fallo durante un periodo dado. La disponibilidad, o más directamente la indisponibilidad, depende no solamente del efecto downtime, sino también de la probabilidad de fallo para realizar su función (efecto de no fiabilidad).

La disponibilidad está fuertemente relacionada con la fiabilidad y la manteni - bilidad. Un sistema fiable requiere menos mantenimiento y una buena mantenibilidad tiempos de reparación más cortos y menores niveles de fiabilidad.

Por tanto, el objetivo ha de ser la intensificación de los conceptos de "manteni - miento planificado" y "mantenimiento efectivo"con objeto de reducir los costes potenciales asociados al downtime.

Por tanto, en cuanto al downtime y sus costes, conviene distinguir entre:

- *Downtime planificado* (recogido en el P.F.). Costes asociados a las tareas de PM, revisiones generales, etc.
- *Downtime no planificado.* Costes asociados a las tareas de correctivo, etc.

El coste del daño y el downtime se imputará al producto a través de la unidad de producción.

- *Coste del mantenimiento óptimo. Modelo general.*

El coste del mantenimiento óptimo, para cada fallo, se obtendrá a través de la siguiente función objetivo:

$$\max\left[\{Ct\ M(CM)+Ct\ D(CM)\} - \{Ct\ M(CM+PM)+Ct\ D(CM+PM)\}\right] \quad \textbf{(53)}$$

$C_tD(CM)$: Coste del downtime, si sólo se aplica CM.

$C_tD(CM + PM)$: Coste del downtime si se aplica CM + PM. Este coste variará con la combinación seleccionada.

(*) El PM se justifica en función de los costes de los recursos vinculados al programa y el downtime requerido frente a la reducción de las consecuencias del fallo. Para un estudio más detallado consultar Coetzee, J.L. (2000/1).

Un objetivo primario para maximizar (53) sería la selección de STM +C con un nivel óptimo de fiabilidad natural con objeto de reducir la necesidad de manteni - miento a lo largo del ciclo de vida.

La reducción del downtime a través de una reducción del tiempo de mantenimiento puede ser realizado a través de diferentes estrategias de gestión del mantenimiento. Una de ellas sería, por ejemplo, la definición de programas de PM basados en el tiempo y en la condición, de bajo downtime, para mejorar la fiabilidad intrínseca con la finalidad de reducir la relación de fallo. Es importante estimar los trade – off (costes asociados a las pérdidas de vida útil residual vs. ganancia de uptime).

3.2. Determinación del coste del downtime. Aspectos a considerar en la fase de diseño.

El downtime resulta un factor dominante cuando el factor de utilización de la unidad de producción es alto.

Es una variable importante, no solamente para las decisiones de gestión del man - tenimiento, sino también para la planificación y control de la producción (reglas de prioridad para gestionar las capacidades de los cuellos de botella, estimación de los tiempos de producción, etc.).

Es importante también tener en cuenta que una reducción en el downtime no necesariamente supone, en todos los casos, una reducción en los costes.

El modelo general para evaluar las pérdidas de ingreso debidas a este factor es una función lineal del downtime:

$$C_tD = D\ (t)\ x\ PD(€/t) \qquad \textbf{(54)}$$

C_tD: Pérdidas de ingresos imputables al downtime
D(t): Duración, en udes. de tiempo
PD(€/t): Pérdidas de ingresos imputables al downtime por udad. de tiempo.

Este modelo aplica en casos especiales (por ejemplo, el "line rental") y no se puede considerar de aplicación general.

Sin pretender realizar un análisis exhaustivo de las diferentes situaciones que se pueden presentar, consideramos importante tener presente para su cálculo los siguientes aspectos:

- *Mantenimiento en operación (running maintenance).*

Si el mantenimiento se puede realizar sin interrupción del proceso de producción *(running maintenance)* el $C_tD = 0$.

- *Modo de operación.*

Muchas unidades de producción tienen más de un modo de operación. Si la unidad de producción no está operativa, con respecto al modo de operación, la ejecución del mantenimiento sobre la misma introduce $C_tD = 0$.

- *Mantenimiento oportunista (opportunistic maintenance).*

Es aquel que se hace coincidir cuando se presenta la oportunidad debido a otro mantenimiento o cuando emergen ventanas de producción en la programación. Si la extensión temporal es la misma o inferior, el $C_tD = 0$.

- *Penalizaciones.*

Un coste diferente de las pérdidas de producción asociadas al downtime puede ser las pérdidas vinculadas a las penalizaciones económicas establecidas en contrato por retraso en la entrega. Algunas acciones para mitigar los efectos de las penaliza - ciones serían:

(a) Acuerdo de asistencia mutua. Es un acuerdo de "préstamo" con otra planta que fabrique el mismo producto. En este caso, el coste del downtime se estima en función de la pérdida de beneficio y los costes de gestión/administración vinculados a las transacciones.

(b) Horas extras, aumento de la producción.

Si el factor de utilización y las características técnicas y de funcionamiento de la unidad de producción lo permiten se puede recurrir a un ajuste de los tiempos de producción o a horas extras. En estos casos el coste del downtime estaría en función del esfuerzo adicional (horas extras, consumo de energía, etc).

(c) Buffer de reserva.

- *Unidades en standby.*

El coste del downtime será la repercusión de este efecto sobre la inversión de la unidad.

Como se observa, el cálculo del coste de este factor puede llegar a ser complejo por la diferente casuística que se puede presentar.

4. MODELO PARA LA MAXIMIZACIÓN DEL ROI_M BAJO RESTRICCIONES ECONÓMICAS, DE TIEMPO Y/O RIESGO TOLERABLE.

La investigación realizada hasta ahora ha defendido la integración de mantenimiento y producción en la formulación de modelos de decisión para la priorización de las actividades de mantenimiento: Weinstein y Cheng (1999), Boukas y Liu (2001), Iravani y Duenyas (2002), Alfares *et al* (2005), Casady y Kutanoglu (2005), Fenner (2000), Al-Najjar y Alsyouf (2003), Labit *et al* (2004), Moore y

Starr (2006),... Sin embargo, ninguno integra los aspectos financieros relacionados con la priorización en términos de ROI.

En US Military Standard, MIL-STD-1629ª (1980), se muestran enfoques para la priorización del mantenimiento en base al FMECA.

Dado que el presupuesto destinado a mantenimiento y el tiempo de parada planificado para una unidad de producción suelen ser limitados, es necesario un modelo que integre, en el proceso de toma de decisiones, las dimensiones críticas para priorizar y ordenar las actividades de mantenimiento con objeto de obtener el máximo ROI _M. Tomamos como referencia el modelo propuesto por Tam & Price (2008b) para la priorización de los trabajos de mantenimiento que maximizan el ROI bajo restricciones de tiempo y presupuesto. La técnica permitirá el diseño óptimo del plan de mantenimiento, en la fase de diseño, en base a las necesidades, requeri - mientos del cliente y las restricciones contempladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, etc.). Permitirá la toma de decisiones informada en la definición y diseño óptimo del plan de mantenimiento.

La priorización se establecerá en base a tres índices: MII (Maintenance Invesment Index), TI (Time Index) y BI (Budgetary Index). Estos índices serán usados como indi - cadores para la tarea de priorización.

4.1. Proceso para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento.

El proceso (figura 145) se desarrolla sobre el marco propuesto por Tam y Price para la optimización de la inversión en mantenimiento, el cual considera tres dimensiones críticas en el proceso de toma de decisiones: dimensión salida, riesgo y recursos (apartado 2 del capítulo II).

El proceso de priorización constas de las siguientes fases:

(a) En base a las necesidades, requerimientos del cliente y las restricciones contem - pladas (tiempo, presupuesto, riesgo tolerable, otras) se definen las entradas principa - pales al proceso: objetivos estratégicos (a nivel financiero, de producción, marketing), nivel de riesgo tolerable y presupuesto.

(b) Recopilación de datos del activo a analizar (de condición, averías, trabajos de preventivo,...) para estimar su rendimiento y proponer tareas de mantenimiento correctivo y preventivo. En base al análisis de estos datos se adoptan decisiones estratégicas (definición de áreas que necesitan mantenimiento, evaluación de los efectos y consecuencias, determinación del nivel de críticidad, otras).

(c) En base a las políticas estratégicas consideradas se determina el presupuesto y el tiempo disponible para el mantenimiento planificado para un periodo de planifica - ción *p.*

(d) Cálculo de los índices *MII*, *TI* y *BI.*

Son necesarios los tres índices para equilibrar las dimensiones financiera (MII), eco - nómica (BI) y temporal (TI). Para este proceso no es necesario un método "absoluta - mente matemático"; se puede utilizar un método semicuantitavo a la hora de asignar los *Rank* ***MII***, *Rank* ***BI*** y *Rank* ***TI*** en las" tablas tipo" (tablas 50 y 51).

(e) Evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento en base a los índices propuestos.

(f) Diseño óptimo del plan de mantenimiento bajo restricciones de tiempo y presu - puesto (STM coste efectivas). En el supuesto que no todas las tareas pueden ser realizadas debido a las restricciones de tiempo y presupuesto establecidas, la incor - poración de tareas para la definición y diseño del plan de mantenimiento se reali - zará en base al nivel de prioridad establecido en función de los índices.

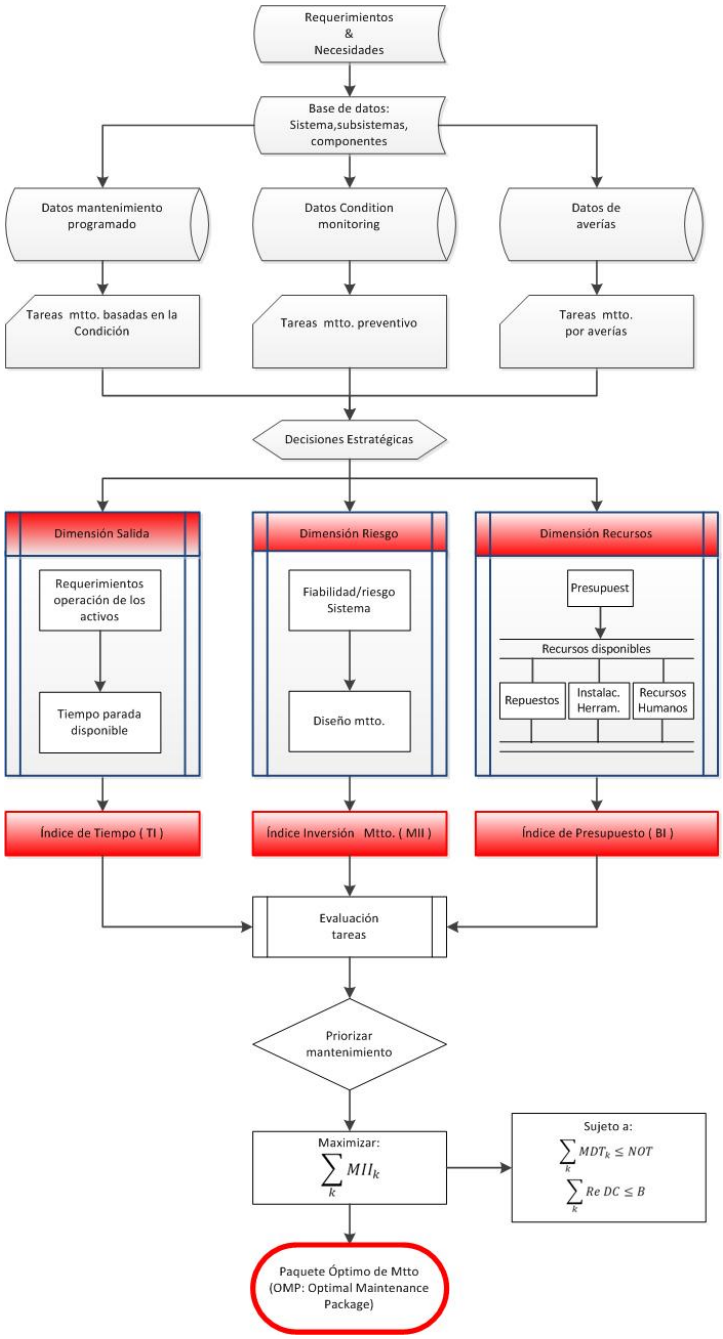


Figura 145: Marco conceptual para la evaluación y priorización de las tareas de mantenimiento. (adaptado de Tam & Price, 2008b)

La reducción del riesgo también se puede ver afectada por factores tales como la disponibilidad de piezas de repuestos, las habilidades, experiencia y formación del personal y la calidad de los trabajos de mantenimiento.

El objetivo será asegurar el máximo MII bajo las restricciones contempladas. Por tanto, la solución pasa por definir Paquetes de Mantenimiento (MP) que presenten el mayor MII con objeto de garantizar el mejor ROI_M. Luego, la priorización de las tareas de mantenimiento puede ser planteada como un problema de optimización donde las funciones características serían:

$$\textit{Función objetivo}\ (a\ \max imizar): \sum_k MII_k \qquad (55)$$

$$\textit{Funciones de condición}(\textit{restricciones}):$$

$$1.-\ \Pr esup uestarias: \sum_k \mathrm{Re}DC_k \leq B \qquad (56)$$

$$2.-\ Tiempo(\ para\ \ ODC \rightarrow 0): \sum_k MDT_k \leq NOT \qquad (57)$$

Las condiciones de restricción no tienen por qué ser absolutas; se pueden aumentar si se justifica con una importante reducción del riesgo y sus consecuencias. Para este propósito se consideran los índices *TI* y *BI*.

4.1.- 1. Notación.

La notación que se utilizará en la descripción del proceso de evaluación y priorización es la siguiente:

B (Budget): Presupuesto.
BI (Budget index): Índice del presupuesto.
K: tarea número k del paquete de tareas de mantenimiento (MP).
MDT_k (Maintenance Downtime para la tarea k): Tiempo requerido para la reali - zación de la tarea k. Si se ejecutara dentro de un "mantenimiento oportunista" el tiempo asignado a esta tarea sería cero.
MII (Maintenance Invesment Index): Indice de inversión en mantenimiento.
MP (Maintenance Package): Paquete de tareas de mantenimiento.
NOT (Non-operating Time): Tiempo de parada disponible (de no operación) para el periodo p.
ODC (Output Dimension Cost): medida de las necesidades de producción y de los objetivos de prestación de servicios para operar un activo. La dimensión salida incluye las interrupciones planificadas requeridas para cumplir con los requeri - mientos de seguridad, calidad y normativos/legales. Se utiliza como base para definir el tiempo disponible para mantenimiento.
OR_p (Operation rate en el periodo de planificación p): Factor de utilización en el periodo p.
P: periodo p de planificación de la planta.
RDC (Risk Dimension Cost): Coste de los sucesos y eventos no planificados y no esperados. Se consideran las consecuencias, es decir, los costes diferidos (penaliza - ciones, multas, etc.) y las primas del seguro para cubrir eventos de baja proba - bilidad de ocurrencia. Se contemplarían, en general, los costes relacionados con la indisponibilidad y la corrección del daño por no mantenimiento. Base para estimar el ROI_M.
Re*DC (Resources Dimension Cost): Gastos de mantenimiento y soporte logístico*
T_p: Tiempo de producción para el periodo p: NOT = (1- OR_p) T_p.
TI: Índice de tiempo.

4.1.- 2. Indices.

Todas las tareas de mantenimiento serán evaluadas y ordenadas de acuerdo a tres índices (tabla 50): MII, TI y BI. La lista de tareas será usada para el diseño óptimo del plan de mantenimiento de acuerdo a las restricciones de tiempo y presupuesto. Para el cálculo de los índices se procede:

(a) Índice de Inversión en Mantenimiento: *MII (Maintenance Invesment Index).*

Se utiliza para medir el retorno del mantenimiento en términos de reducción del *RDC* en base al gasto requerido (en recursos y soporte logístico). Se define como:

$$ROI - M \simeq MII = \frac{Coste\ de\ indisponibilidad\ y\ daño(indirecto\ de\ mantenimiento)}{Coste\ de\ disponibilidad(directo\ de\ mantenimiento)} \qquad \textbf{(58)}$$

El *ROI_M* se interpreta como una reducción del *RDC* en un periodo de tiempo dado (normalmente el ciclo de vida establecido). Por su parte, el gasto en manteni - miento considera el coste de los recursos para las acciones de mantenimiento más los costes de pérdida de operación (*ODC*), donde se contemplarían las compensaciones por downtime. Las penalizaciones y bonificaciones se contemplarían en el numerador:

$$MII = \frac{\Delta(RDC)}{\mathrm{ReDC} + \mathrm{ODC}} \qquad \textbf{(59)}$$

El coste del riesgo será función del coste de los recursos. La principal variable controlable en el proceso de optimización será el coste de los recursos destinados a la formación y preparación del personal y la calidad del mantenimiento.

Este índice se utilizará para asegurar que el objetivo de priorización de las tareas de mantenimiento es obtener el máximo retorno en términos de reducción del riesgo. Además, las pérdidas en producción, al ser medidas en relación al *ODC*, son preferibles que sean nulas, a no ser que se justifiquen por una elevada reducción del riesgo.

(b) Índice de Tiempo: *TI (Time Index).*

Se utiliza para medir el tiempo necesario para completar una tarea de mantenimiento con respecto al tiempo de interrupción disponible (NOT). Es un indicador para comparar el tiempo requerido por una acción con respecto a otra para un programa de mantenimiento alternativo. Se define como:

$$TI = \frac{\sum_k MDT_k}{\mathrm{NOT}}, \quad TI \leq 1 \qquad \textbf{(60)}$$

(c) Índice de Presupuesto: *BI (Budget index).*

La dimensión recursos está condicionada, para un periodo *p*, por el presupuesto asignado para mantenimiento y reemplazo, lo cual limita el nivel de recursos que pueden ser consumidos. Indica la parte de fondos que absorbe una tarea en relación al total dispuesto en presupuesto. Se define como:

$$BI = \frac{\mathrm{Re}DC_k}{\mathrm{B}}, \quad BI \leq 1 \qquad \textbf{(61)}$$

4.1.- 3. Método de ordenación.

Para cada MP se obtiene sus tres índices por suma de los valores de los índices asociados a cada tarea (tablas 50 y 51). Es importante tener la información desagre - gada por tarea para poder hacer los análisis oportunos para diferentes combinaciones y supuestos. Por ejemplo, si se considera que el peso asignado a cada índice, en función de las características del problema o la naturaleza del sistema, no es el mismo; se quiere realizar una comparación en sólo dos dimensiones (MII y BI, si el downtime no es un factor dominante; MII y TI, si los costes diferidos del downtime, como sucede con los sistemas de producción continua o intensivos en capital, son importantes); etc. Con objeto de mostrar el mejor retorno en la reducción del riesgo de un plan se propone ordenar los planes desde el MII más alto al más bajo (más coste efectivos). Esto es, el de mayor MII se le asigna un 1 en la su *columna de Rank*; el que le sigue un 2, y así sucesivamente. Se propone el criterio inverso para los índices BI y TI (desde el más bajo al más alto) para reflejar los que consumen menor tiempo y suponen menor coste. Esto es, el de menor BI se le asigna un 1 en su *columna de rank*; el mismo criterio para el TI.

El valor medio (*AverageRank)* se calcula por suma simple, en el supuesto de que se considere el mismo peso para todos los índices; o de forma ponderada, en el caso contrario.

Un número de prioridad es asignado en función del *AverageRank.* El número 1 (más alta prioridad) corresponde al del menor valor de *AverageRank*. La más alta prioridad indica que la tarea (o el MP) es la de mayor MII y menor BI y TI.

Tabla 50: Tabla tipo para el análisis y diseño de un paquete de mantenimiento.

MP$_i$	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***MII***	***BI***	***TI***	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
Task$_i$1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
Task$_i$2											(*)	
Task$_i$3											(*)	
…											(*)	
$\sum_k$												

Tabla 51: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento.

MP$_i$	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***MII***	***BI***	***TI***	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
MP1								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
MP2											(*)	
MP3											(*)	
...											(*)	

(*) $$Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \frac{Rank\,MII + Rank\,TI + Rank\,BI}{3}$$

Para la resolución de problemas complejos se puede recurrir a la utilización de herramientas de programación dinámica, entre otras.

Campos abiertos para más investigación (áreas a estudiar):

1. Para la resolución de problemas complejos se puede recurrir a la utilización de herramientas de programación dinámica, entre otras.
2. Habrá que valorar el proceso de selección del plan óptimo de mantenimiento cuando se calcula el RDC introduciendo las garantías de desempeño y sus ecuaciones de compen - sación; esto va a afectar al valor del MII, parámetro crítico en el proceso de priorización.

4.1.- 3.1. Caso particular: Limitación del nivel máximo de riesgo.

Los sistemas tecnológicos complejos de producción continua e intensivos en capital (plantas nucleares, plantas químicas, parques eólicos, infraestructuras de transporte, plantas de fabricación) o determinados tipos de compañías que operan con activos caros o peligrosos (de navegación aérea, marítima, ferroviario) están interesadas en garantizar un nivel tolerable de riesgo. Para asegurar que dichos niveles no son superados están dispuestas a invertir más en mantenimiento y otras medidas que contribuyan a la reducción del *RDC*. En tales casos, el reto está en asegurar que el nivel de riesgo tolerable no se exceda con los mínimos recursos (Re*DC*) y mínimos costes de interrupciones:

$$\text{RDC = nivel tolerable} \left\{ \begin{array}{l} ODC \rightarrow 0 : \sum_k MDT_k \leq NOT \\ \min \text{Re}DC \end{array} \right\} \quad \textbf{(62)}$$

Para definir el plan óptimo de mantenimiento en este tipo de casos, o similares, el marco de referencia para la toma de decisiones en el proceso de priorización sería el siguiente (figura 146):

Figura 146: Marco conceptual para la evaluación y priorización bajo restricciones económicas, temporales y de riesgo de las tareas de mantenimiento (adaptado de Tam & Price, 2008b).

En la base de datos de mantenimiento se recoge y registra diferentes tipos de datos, en base a los cuales, se generan diferentes tareas de mantenimiento a las que se les asigna sus índices de priorización. Las tareas son incorporadas al programa de mantenimiento hasta que el objetivo de riesgo tolerable es alcanzado.

Si el programa diseñado excede las restricciones de tiempo y/o presupuesto se activa un proceso de análisis, a nivel de Alta dirección, o de equipo nuclear de diseño, para decidir si es posible modificar los límites o ajustar los requerimientos de la salida. En el caso de que los límites económicos y de tiempo no sean modificables, se evalúa la posibilidad de aumentar el límite de riesgo tolerable.

Es muy importante una buena comprensión de la relación Re*DC* vs. *RDC* para obtener la relación coste vs. riesgo, para cada plan. Para conseguir este objetivo se propone utilizar conjuntamente:

- la tabla 52 para combinar diferentes tareas que nos brinden diferentes paquetes alternativos de mantenimiento, y

- el gráfico Re*DC*- RDC (figura 147) para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema en cuanto a las restricciones.

Tabla 52: Tabla tipo para la ordenación y priorización de un plan de mantenimiento: Combinación de diferentes paquetes alternativos de mantenimiento.

Package	***MP$_i$***	***RDC***	**ReDC**	***ODC***	***MDT***	***MII***	***BI***	***TI***	*Rank* ***MII***	*Rank* ***BI***	*Rank* ***TI***	*Average Rank*	*Prioridad*
1	***MP1***								*De mayor a menor*	*De menor a mayor*	*De menor a mayor*	(*)	
2	***MP2***											(*)	
3	***MP3***											(*)	
4	***MP4***											(*)	
12	***MP1 MP2***												
13	***MP1 MP3***												
14													
23													
24													
34													
123													
124													
134													
234													
1234													

(*) $$Average\,Rank\,(\text{sin } ponderación) = \frac{Rank\,MII + Rank\,TI + Rank\,BI}{3}$$

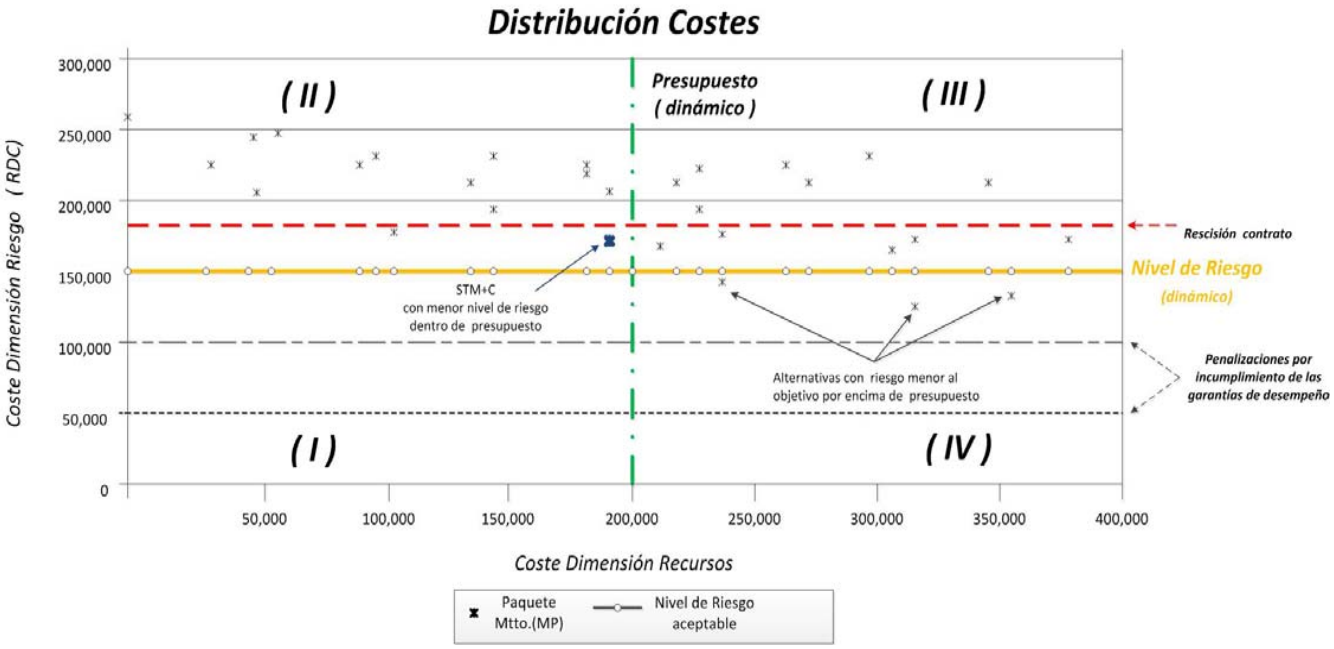


Figura 147: Gráfico Re*DC*- RDC para seleccionar el mejor MP en base a los grados de libertad del sistema.

En el gráfico se pueden caracterizar cuatro regiones:

- *Región (I):* Planes de mantenimiento que cumplen las restricciones de presu -

puesto y riesgo.

- *Región (II):* Planes de mantenimiento que cumplen las restricciones de presupuesto.
- *Región (III):* Planes de mantenimiento no válidos.
- *Región (IV):* Planes de mantenimiento que cumplen la restricción de riesgo con mayor presupuesto.

ANEXO IV

COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC).

MÉTODOS BÁSICOS Y REFERENCIAS.

COSTE DEL CICLO DE VIDA (LCC). MÉTODOS BÁSICOS Y REFEREN - CIAS.

La Gestión de Activos(Asset Management) consiste en la organización del ciclo de vida de un activo con objeto de obtener, al mínimo coste y para el total del tiem - po de vida asignado(ciclo de vida), la máxima disponibilidad, efectividad, producti - tividad y la más alta calidad. Para alcanzar los objetivos indicados resulta funda - mental un diseño apropiado (eficiencia) y un conocimiento de la estructura y compo - sición de los costes del ciclo de vida para una acertada y rentable gestión en la fase de explotación. (Schram,G.,2002)

Los orígenes del LCC parten de 1960 de la Industria americana de defensa para apoyar la toma de decisiones vinculada a la adquisición de los nuevos sistemas de defensa. En 1965, el Departamento de Defensa edita un documento (MIL-STD 785-Reliability Programs for Systems and Equipment) donde reconoce que si los problemas potenciales en los nuevos equipos y sistemas eran detectados y tratados en origen (en las etapas iniciales) se reducen los costes en las etapas de desarrollo del ciclo de vida. También descubrió que la integración de la Ingeniería de Fiabilidad con el diseño, el desarrollo y la producción generaba una reducción de los costes en servicio mayores que los gastos incurridos en los programas de fiabilidad.

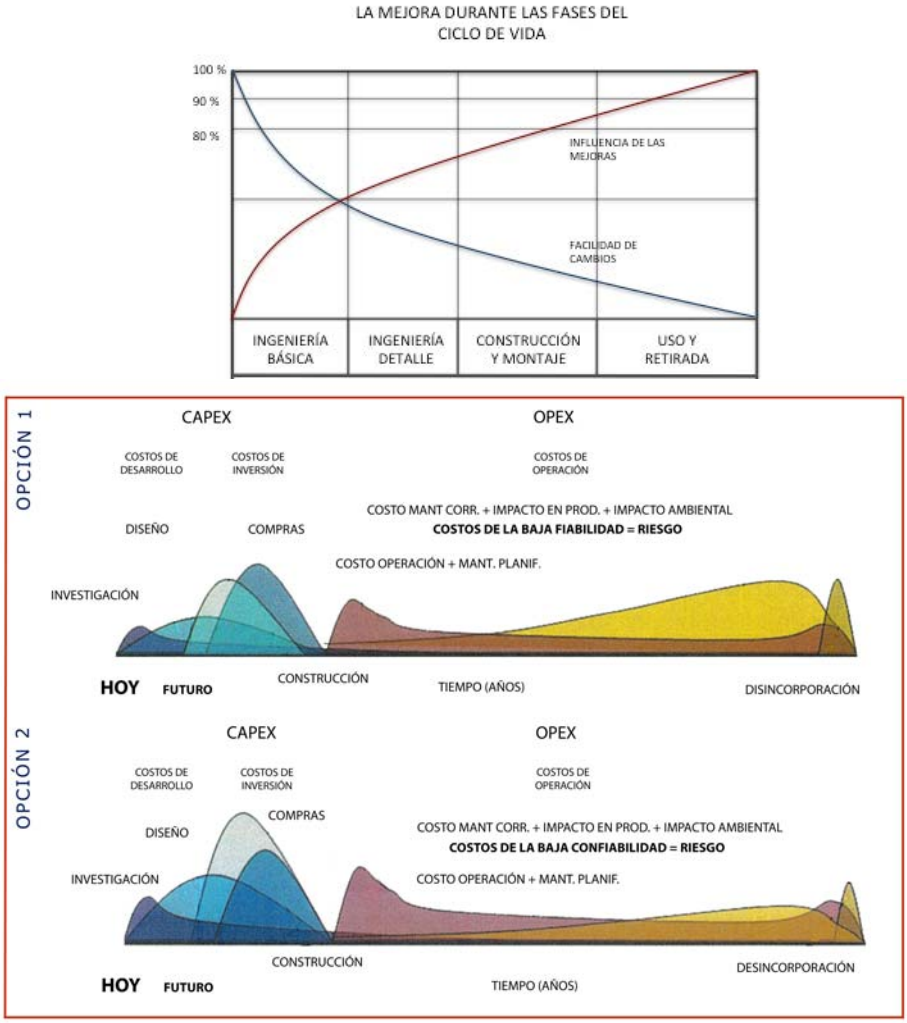


Figura 148: Efectos de la fase de adquisición (etapa de diseño) sobre las fases de operación y mantenimiento (González Fernández, F.J., 2008).

Durante el periodo de 1970 hasta comienzos de los 80 el análisis LCC fue principalmente aplicado en el campo militar. Después de ese periodo, las aplicaciones se extendieron a otro tipo de industrias tales como la industria aeronáutica, plantas de generación de energía, petroleras e industrias químicas y ferroviarias.

En este Anexo se da una visión del tema sin entrar en profundidad en los cálculos estadísticos y financieros que a menudo deben acompañar a este tipo de estudios.

1. DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES.

- *Ciclo de vida (Life - Cycle).* Según McKenna, T. y Oliverson, R. (1997), se define como las fases a través de las cuales un item, producto, equipo o sistema pasa desde su concepción hasta su traspaso/eliminación (figura 149):

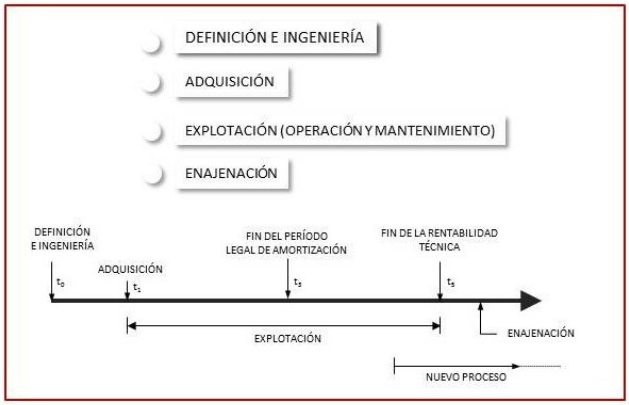


Figura 149: Ciclo de vida de un activo físico (González Fernández, F.J., 2008).

- *Coste del Ciclo de Vida (Life – Cycle Cost).* Según McKenna, T. y Oliverson, R., (1997), representa el coste total de una pieza de un equipo o sistema a lo largo de todo su tiempo de vida (total de todos los costes generados, o pronosticados, durante el diseño, desarrollo, producción, operación, mantenimiento y procesos secundarios de soporte). Incluye los costes directos, indirectos, recurrentes y no recurrentes, tales como: la adquisición, instalación, operación, mantenimiento, mejoras y eliminación o traspaso.
- *Life - Cycle Costing (LCC).* Esta metodología puede ser definida como:

- Práctica/ejercicio/procedimiento para obtener el mejor uso de los activos físicos, de acuerdo con los objetivos establecidos por la organización, al menor coste a lo largo de su tiempo de vida. Es una combinación de disciplinas de gestión, financiera, ingenierías, etc.
- Según Hansen R.C. (2011) , metodología de negocio que examina el coste total (suministro, operación, mantenimiento y traspaso/eliminación) de un equipo de un sistema en relación con los beneficios (ingresos) a lo largo de la vida total de la unidad (normalmente sobre 20 o 30 años).
- Proceso para la estimación y evaluación del coste total de adquisición, operación, mantenimiento y eliminación/traspaso durante la vida proyectada para un equipo. Típicamente utilizado como técnica de comparación de la mejor alternativa u opción.(Aptitudexchange Glossary)

- *Conductores de costes (Cost driver):* Elementos del LCC que tienen un impacto importante sobre el análisis *(IEC60300-3-3).*

- *Perfil de costes (cost profile):* Representación gráfica, o en tabla, que muestra la dis tribución de costes de un producto a lo largo de su ciclo total o parcial de vida. (IEC60300-3-3: Life cycle costing)
- *Maintenance support performance.* Habilidad/capacidad de la organización de mantenimiento de proveer, bajo demanda, y para una política de mantenimiento establecida y unas condiciones dadas, los recursos requeridos para mantener un item *(IEC60050 (191)).*
- *Soporte logístico:* Conjunto de materiales y servicios requeridos para operar, man - tener y reparar un sistema. Incluye la identificación, selección, adquisición, progra - mación, almacenaje y control de stocks, distribución de repuestos, instalaciones, equipos soporte, etc. (McKenna, T. y Oliverson, R., 1997)
- *Soportabilidad (Supportability).*Característica inherente al diseño e instalación que permite un mantenimiento efectivo y eficiente y apoya al sistema a través del ciclo de vida planificado. (Blanchard, B.S. y Fabrycky, W.J., 1998)
- *Punto de rentabilidad técnica.* Es aquel que desde un punto de vista de coste del ciclo de vida unitario, la línea de ingresos o de beneficios que aporta la instalación, sistema o maquinaria es igual, o superior, a la línea de costes (figura 150):

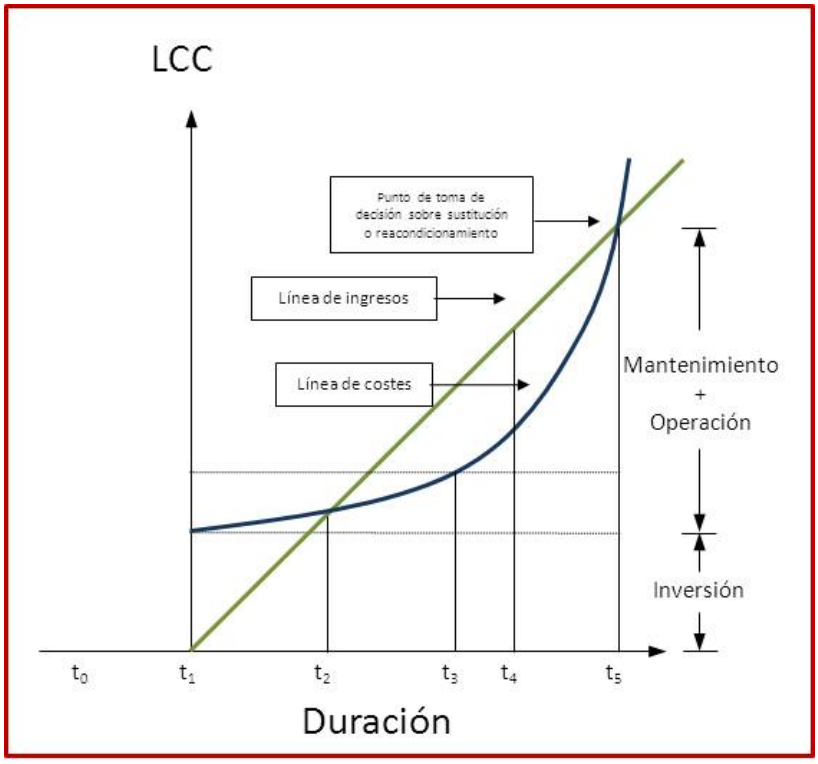


Figura 150: Punto de rentabilidad técnica (González Fernández, F.J., 2008).

Partiendo de t_0, donde ya se incurre en costes por las etapas de proyecto e ingeniería, el primer coste definido es el coste de inversión (t_1). Las primeras fases (de instalación y puesta en marcha) implican que la línea de costes está por encima de la línea de ingresos. Una rigurosa y gestión apropiada de la toma de decisiones en la fase de adquisición (proceso de diseño, proceso de selección de la mejor alternativa, etc.) y una acertada gestión del ciclo de vida son claves para aumentar el área encerrada por ambas curvas (ROI de la inversión).

2. ESTRUCTURA BÁSICA EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL LCC: FASES DEL ANÁLISIS Y TIMING.

El análisis del coste del ciclo de vida (LCCA) es el término que se utiliza para calificar, de forma colectiva, un conjunto de técnicas de análisis de diferente tipo (análisis RAM, análisis económico, análisis de riesgo, análisis de sensibilidad, etc).

Análisis LCC* = *Análisis RAM* + *Análisis económico/financiero + Análisis de riesgo + Análisis sensibilidad + etc.

Figura 151: El objetivo del análisis LCC es la determinación del coste total (costes de adquisición y propiedad) de un activo /producto/sistema a través de su ciclo total de vida (Dangel, R., 1969).

La siguiente figura ilustra el conjunto de técnicas básicas en función de las seis fases que se identifican como comunes a todos los análisis:

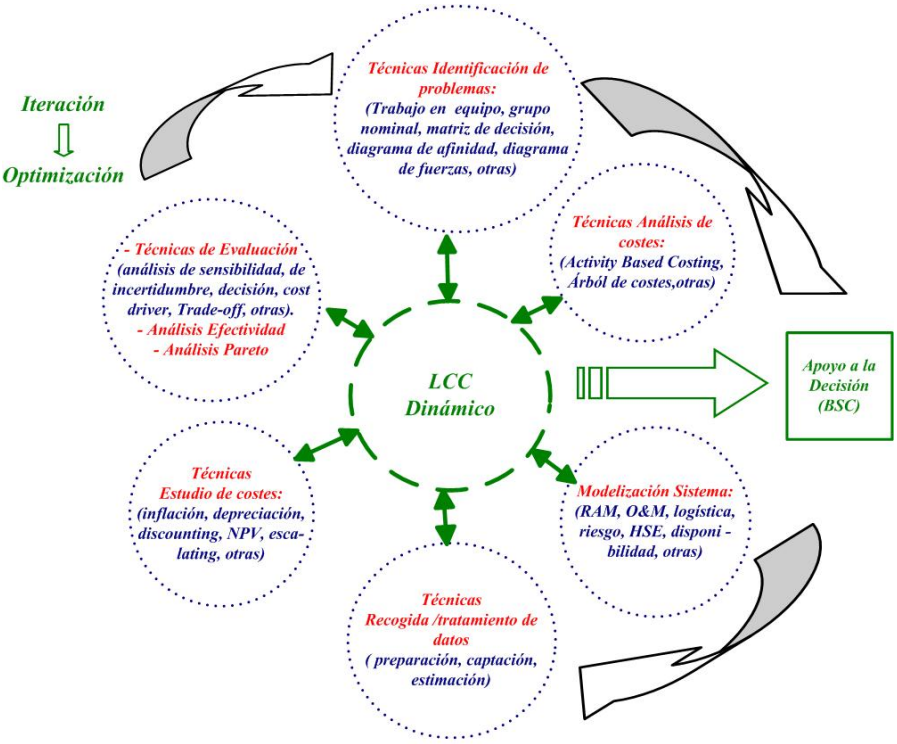


Figura 152: Técnicas semicuantitativas básicas para el análisis LCC.

Uno de los objetivos principales del análisis LCC es cuantificar el "Coste Total de Propiedad" de un sistema, producto, etc. a lo largo de su ciclo total de vida, el cual comprende las etapas de investigación y desarrollo, construcción, operación y mantenimiento, traspaso/eliminación. Los resultados del análisis pueden ser utilizados para (IEC60300-3-3: Life cycle costing):

- Evaluar y comparar alternativas de diseño;
- Evaluación de la viabilidad económica de proyectos/productos;

- Identificación de los “conductores de costes”. El análisis detallado de los “Árboles de Costes” permitirá identificar los inductores de costes críticos (o los inductores de ingresos críticos) cuyo control resulta esencial para alcanzar los resul - tados establecidos.
- Orientación de las” acciones de mejora coste efectivo”. Definición de una “hoja de ruta”o “mapa de gestión de activos” que permita extraer, en base al consen - so de los agentes responsables de su cumplimiento, los ratios y los clusters de ratios para la gestión.
- La alineación de objetivos a nivel estratégico, táctico y operativo.
- Evaluación y comparación de estrategias alternativas de productos, opera - ción, test, inspecciones, mantenimiento, mercados, etc.
- Evaluación y comparación de diferentes enfoques para la renovación/ reha - bilitación/extensión de vida o eliminación de instalaciones.
- Distribución óptima de los recursos disponibles (soporte científico a los pro - cesos de presupuestación).
- Evaluación de los criterios de seguridad de un producto o sistema por verifi - cación de los test y los trade-off.
- Fijar las tolerancias, y por tanto, los niveles de desviación admisibles para la consecución de los resultados.
- Fijar los niveles de” alerta temprana” y definir los planes de actuación para corregir las desviaciones detectadas.
- Planificación financiera a largo plazo.
- Generar una base de datos que oriente la toma de decisiones a futuro, etc.

El procedimiento y el conjunto de técnicas a utilizar para realizar un análisis LCC dependerá del sistema a analizar. Sin embargo, de los procedimientos propues- tos en IEC60300-3-3, SAE ARP-4293, Fabrycky, W.J y Blanchard, B.S. (1991), Greene, L.E. y Shaw, B.L. (1990), Clarke, J.D. (1990), Kenna,T. M. y Oliverson, R. (1997) se extraen un conjunto de fases que son comunes y esenciales para todos los análisis.

2.1. Fases básicas del análisis.

El objetivo básico es la obtención del modelo (a priori o posteriori) que define el sistema a analizar/estudiar:

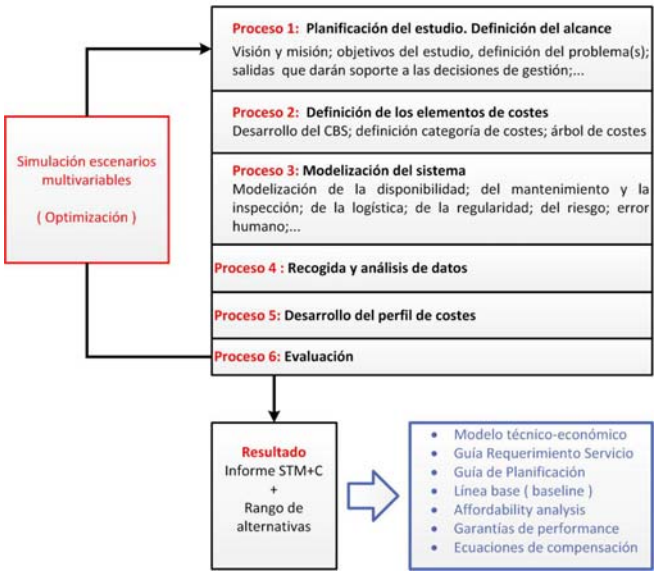


Figura 153: Fases básicas del análisis LCC de un sistema.

➢ ***Proceso 1: Planificación del estudio. Definición del alcance.***

Como se indicó, el LCC es una técnica para dar soporte al proceso de toma de decisiones. Por tanto, la fase inicial será la de planificación. En esta fase deben definirse claramente:

- La Visión y misión (declaraciones de consenso).
- Los objetivos del estudio. Definición del problema(s).
- Identificación de los activo/s objeto del estudio.
- Las salidas que darán soporte a las decisiones de gestión.
- Las fases del ciclo de vida que son relevantes para el estudio.
- Criterios de evaluación.

Las opciones a comparar son establecidas al principio del estudio. Sin embargo, al ser un proceso dinámico y multidisciplinar, la lista puede evolucionar con el tiempo descartándose opciones e incorporándose nuevas alternativas que surgen en el proceso en respuesta a las limitaciones observadas. Estas pueden venir definidas, entre otras, por:

- Especificaciones de funcionamiento.
- Características del emplazamiento.
- Limitaciones de presupuesto.
- Vida mínima exigida al activo (tiempo/cantidad de producción).
- Efectividad (capacidad de producción, calidad del producto, disponibilidad, etc).
- Estructura mantenimiento & operación (filosofía de operación, política de mantenimiento, etc.).

Una definición precisa, consensuada y estable del ámbito y alcance del estudio es necesaria para obtener los elementos de costes relevantes. De igual modo, es impor - tante definir clara y consensuadamente todas las hipótesis de partida del análisis.

➢ ***Proceso 2: Definición de los elementos de costes.***

El LCC es una técnica que permite comparar alternativas de inversión en las que se consideran los costes totales asociados a la adquisición y operación de un equipo/sistema a lo largo del tiempo total de vida considerado. El LCC previsto representa una información de gran utilidad no sólo para tomar decisiones a nivel de selección de la mejor alternativa coste efectiva (nivel de compra), sino también en la optimización del diseño, la planificación y programación del mantenimiento y la planificación de las inversiones en renovación de equipos. El nivel de agregación/de-sagregación del dato de coste será función de la naturaleza y el nivel exigido por la aplicación en estudio. Independientemente de la naturaleza y el nivel de detalle exigido, existen dos aspectos que deben ser claves:

- Incluir todos los costes (resultan interesantes metodologías de análisis como el ABM + ABC).
- Considerar el ciclo de vida entero.

Es importante disponer de la estructura total de costes al principio del proyec - to/estudio para asegurar que todos los costes han sido contemplados y evitar duplicidades que distorsionen la información en el proceso de toma de decisiones. Para este propósito resulta interesante un enfoque centrado en procesos y metodologías tales como el ABC y ABM.

Desarrollo de la estructura desagregada de costes (CBS).

Es muy importante identificar todos los "elementos de costes"que influyen en el total del LCC del sistema. Se recomienda realizar esta definición de una manera sistemática con objeto de evitar ignorar elementos que puedan resultar significativos para el análisis. El Standard internacional (IEC 60300-3-3) recomienda desarrollar el CBS por definición de los elementos de costes identificados por un sistema de tres ejes independientes que denomina: "Fase del ciclo de vida", "estructura desagregada Producto/trabajo", "categoría de costes" (figura 154).

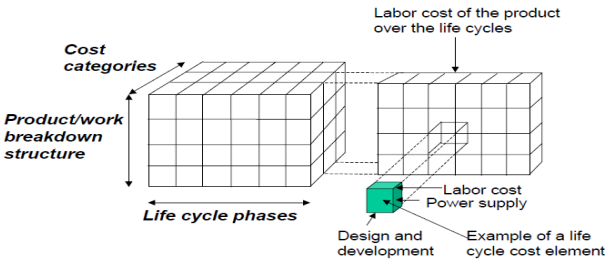


Figura 154: Concepto de elemento de coste (fuente: IEC-60300-3-3).

- ***Definición de las categorías de costes.***

Tal y como se indicó, es muy importante identificar todos los elementos de costes que de forma significativa afectan al LCC total. Dado la variedad de sistemas, es difícil establecer un modelo universal que permita definir los elementos de costes asociados a cada análisis LCC. Referencias de definiciones de elementos de costes aplicados en algunas industrias pueden ser consultadas en el apéndice B del estudio de Kawauchi, Y. & Rausand, M. (1999). La recomendación generalizada es que se particularice el CBS y las categorías de costes para cada área de aplicación del análisis LCC. Sin embargo, existen unas categorías de costes que son comúnmente usadas en muchos estudios: Costes de Adquisición y Costes de Propiedad (adoptada por IEC 60300-3-3). Estas dos categorías pueden ser alternativamente denominadas, según ISO15663, como"Gastos de Capital (CAPEX)" y "Gastos de Operación (OPEX)". Esto no debe ser considerado una referencia rígida, sino todo lo contrario, flexible en función del sistema en análisis. En el siguiente apartado se incluyen otras referencias al más alto nivel del CBS.

- ***Etapas para el Desarrollo del perfil de Costes. Árbol de costes.***

En el estudio de la etapa de desarrollo del Perfil de Costes del ciclo de vida de un equipo, una pieza del mismo o un sistema, se pueden distinguir tres fases básicas:

- Estudio de los Costes de Adquisición.
- Estudio de los Costes de Sostenimiento (comprende los costes relacionados con la operación, mantenimiento, mejoras, etc.).
- Estudio de los Costes de desmantelamiento y traspaso/eliminación.

La definición del "árbol de costes" para cada fase es una forma gráfica muy interesante de presentar la información de la estructura y sus elementos de costes. Se presenta, de forma simplificada, tomando como base esta metodología, un ejemplo de estructuras básicas de costes para las diferentes fases:

- *Costes de adquisición:*

El árbol de costes de la figura 155 identifica algunos de los elementos de los costes de adquisición que deben ser considerados en esta fase del ciclo de vida de un equipo/ sistema:

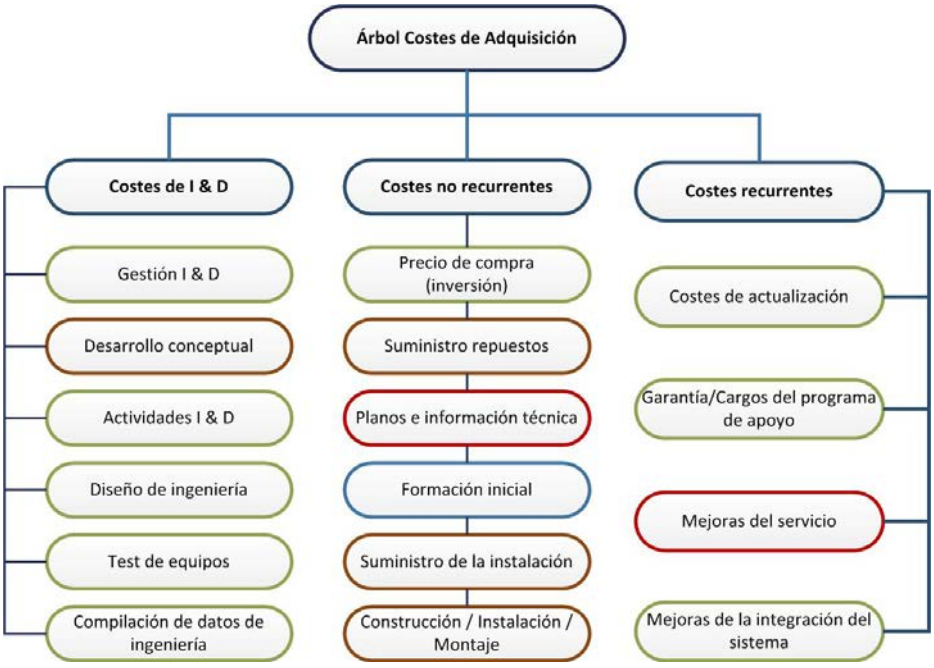


Figura 155: Ejemplo de diagrama de árbol Costes de Adquisición.

En esta fase se considera muy importante, para la mejora de la efectividad y productividad real neta, la evaluación de los costes vinculados al plan de formación (por parte de la compañía suministradora) y las partidas vinculadas a los costes recurrentes (contrato de asistencia con la empresa suministradora: actualizaciones, programa de apoyo, mejoras de servicio e integración de componentes, etc.).

- *Costes de sostenimiento/funcionamiento:*

El árbol mostrado en la figura 156 identifica algunos de los costes de sosteni - miento que deben ser considerados:

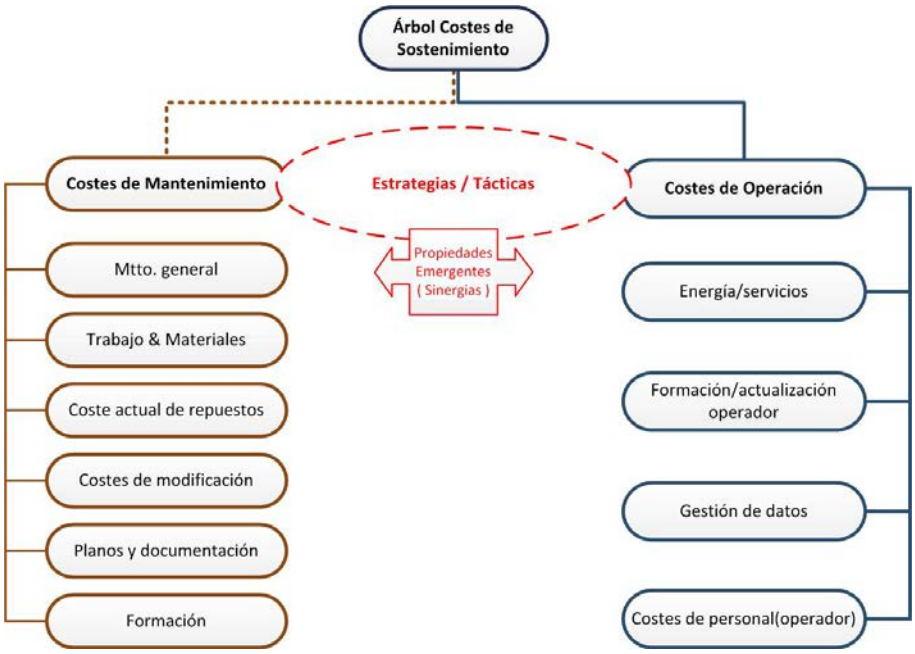


Figura 156: Ejemplo diagrama de Árbol Costes de Sostenimiento/funcionamiento.

➢ *Costes de desmantelamiento y traspaso/eliminación:*

La figura 157 identifica algunos de los costes que deben ser considerados en es - ta fase:

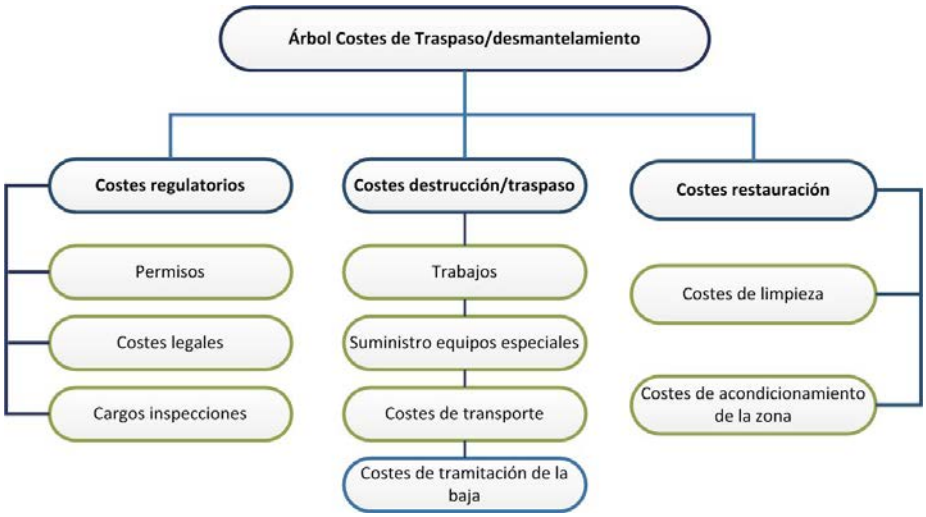


Figura 157: Ejemplo Diagrama de Árbol Costes desmantelamiento y traspaso/venta.

Otra categoría de clasificación de costes al más alto nivel del CBS común para las plantas de producción de energía, gas o petróleo, es la siguiente: "Costes de adquisición", "Costes de operación" y "Costes diferidos de producción". Esta última categoría hace referencia a la penalización (penaltis) por incumplimiento de las condiciones de suministro establecidas en contrato (normalmente referenciadas a la cantidad a suministrar en un periodo dado). Su cuantificación se hace, generalmente, sobre la base de la indisponibilidad de funcionamiento del sistema de producción y una unidad de coste del producto (ecuación de compensación negativa). El coste de esta categoría puede tener un impacto importante sobre el LCC si la indisponibilidad del sistema y/o la unidad de coste del producto son altos. Luego, para este tipo de industrias, o similares, es una categoría muy importante a tener en cuenta en el análisis LCC.

Otra categoría de clasificación de costes puede incluir los "costes de peligrosi - dad o riesgo", como sucede en la industria ferroviaria o la navegación aérea comer - cial.

Como conclusión se extrae que existen unas referencias generales. Dependien - do del tipo de industria/sistema a analizar es necesario realizar un análisis exhaustivo (contextualización) para conocer los principios de funcionamiento que permitan identificar las categorías y la estructura de costes que resultan significativos con objeto de que el LCC cumpla con las funciones que se le exige.

➢ ***Proceso 3: Modelización del sistema.***

El siguiente paso es la definición de un modelo/s que permita cuantificar los elementos de costes del análisis LCC. Para diseñar el modelo es necesario establecer las relaciones apropiadas entre los parámetros de entrada y los elementos de costes. Es posible que existan disponibles modelos ya desarrollados que permitan estimar con precisión dichos elementos; en caso contrario, habrá que construir nuevos modelos que se adapten al comportamiento del sistema en estudio. Son importantes los estudios de benchmarking como proceso de investigación y apoyo a la innova - ción.

En general, un sistema puede ser modelizado desde diferentes puntos de vista: disponibilidad, mantenibilidad, fiabilidad, logística, riesgo/peligros, error humano en el sistema, etc. Sin embargo, se considera que la disponibilidad y la mantenibilidad representan los más relevantes "conductores de costes" en el análisis LCC. Los motivos básicos son los siguientes:

- *Por su impacto sobre los costes categorizados como de operación y soporte.*

Por ejemplo, la disponibilidad de las instalaciones de producción (o mejor la in - disponibilidad) tiene un peso importante sobre los denominados "costes de pro - ducción diferidos". Si el producto tiene un alto valor de venta, el coste de producción diferido aumenta en sintonía. Por tanto, cuanto mayor sea el precio de venta del producto tanto más importante será disponer de una alta disponibilidad de las instalaciones para reducir el LCC total.

- *Porque son parámetros que pueden ser controlados a nivel interno en la fase inicial de diseño del sistema.*

De acuerdo con los argumentos expuestos, resulta muy importante una correcta y apropiada modelización de la disponibilidad y mantenibilidad del sistema.

- ***Modelización de la disponibilidad.***

La disponibilidad *(Availability)* es una medida del funcionamiento/rendimiento total de un sistema. Representa la proporción de tiempo, del total, que un item de un equipo es capaz de realizar sus funciones específicas. Una de las consideraciones a tener en cuenta en esta definición es la referencia de tiempo (tiempo de calendario o tiempo de operación programada). Dado que en cualquier estrategia de operación el uptime de los equipos es un parámetro clave, esta es una medida, y uno de los prin - cipales objetivos, de los gerentes de mantenimiento. La disponibilidad depende, y de hecho es el resultado, de la fiabilidad, mantenibilidad y de las operaciones de mante - nimiento.

De forma general, la disponibilidad se puede definir como:

$$Availability = \frac{Uptime}{Uptime + downtime} \quad \textbf{(62)}$$

Existen otras formas diferentes de medir la disponibilidad, y por tanto, diferentes expresiones para su medida. La disponibilidad, al igual que la fiabilidad y la mantenibilidad, es una probabilidad. Por lo tanto, para cuantificarla hay que recurrir a la teoría de la probabilidad. Sin embargo, a largo plazo (régimen permanente) puede ser determinada a través de las expresiones siguientes. Dependiendo de lo que se incluya en el análisis del uptime y el downtime podemos distinguir las siguientes expresiones para el pronóstico de la disponibilidad:

- *Disponibilidad inherente (Inherent Availability).* Es considerada como un parámetro de diseño del equipo. Está basada solamente sobre la distribución del fallo y el tiempo de reparación. Asume que no existen retrasos en el tiempo de suministro y de reparación y no considera el mantenimiento planificado (preventivo/correctivo).

$$A_{Inh} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad \left\{ \begin{array}{l} MTBF = Tiempo\ Medio\ entre\ Fallo \\ MTTR = \ Tiempo\ Medio\ para\ \mathrm{Re}\ parar \end{array} \right\} \textbf{(63)}$$

- *Disponibilidad realizada/alcanzada (Achieved Availability).* No considera los retrasos de suministro y mantenimiento. Se contempla las estrategias y operación del mantenimiento preventivo (planificado y no planificado). El objetivo de las operaciones de mantenimiento es encontrar el balance óptimo entre el mantenimiento programado y no programado que se corresponda con el punto máximo de la curva de disponibilidad.

$$A_a = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M}} \left\{ \begin{array}{l} MTBM = Tiempo\ medio\ de\ Mantenimiento\ preventivo \\ \overline{M} = downtime\ medio\ (esperado)\ del\ sistema\ (incluye\ mantenimiento\ preventivo \\ planificado\ y\ no\ planificado).\ No\ incluye\ los\ retrasos\ en\ el\ suministro\ ni\ en \\ el\ mantenimiento. \end{array} \right\} \quad (64)$$

- *Disponibilidad operacional (Operational Availability).* Pleno funcionamien - to adaptado al entorno de operación. Considera los retrasos de suministro y manteni - miento y parte de las paradas no programadas. Representa el "bottom line" del funcionamiento. Se ve influenciada por las decisiones tomadas con respecto a los niveles de recursos y la efectividad de las operaciones de mantenimiento.

$$A_O = \frac{MTBM}{MTBM + \overline{M'}} \left\{ \begin{array}{l} MTBM = Tiempo\ medio\ de\ Mantenimiento\ preventivo. \\ \overline{M'} = downtime\ medio\ (esperado)\ del\ sistema.\ Incluye\ mantenimiento\ preventivo \\ planificado\ y\ no\ planificado\ y\ los\ retrasos\ en\ el\ suministro\ y\ en\ mantenimiento. \end{array} \right\} \quad (65)$$

- *Disponibilidad operacional generalizada* .Cuando el equipo no funciona de forma continua.

$$A_{O'} = \frac{MTBM + readytime}{MTBM + readytime + \overline{M'}} \left\{ \begin{array}{l} MTBM = Tiempo\ medio\ de\ Mantenimiento\ preventivo \\ \overline{M'} = downtime\ medio\ (esperado)\ del\ sistema.\ Incluye\ mantenimiento\ preventivo \\ planificado\ y\ no\ planificado,\ los\ retrasos\ en\ el\ suministro\ y\ en\ mantenimiento. \\ readytime = tiempo\ de\ preparación. \end{array} \right\} \quad (66)$$

Un aspecto que refuerza los estudios LCC es que a medio/largo plazo, la demanda de producción sobre los activos aumenta, y con ello, el nivel de stress sobre los equipos de producción. Esta situación conduce a una caída de la disponibilidad reali - zada. Al mismo tiempo, la gestión de mantenimiento trata de aumentar la disponibi - lidad operacional con objeto de cumplir con las demandas de producción. El punto de convergencia en este proceso se encuentra en actuar sobre la disponibilidad inhe - rente, la cual se localiza en la etapa inicial del diseño.

Pueden encontrarse otras medidas en Blanchard, B.S. y Fabrycky, W.J. (1998); Kenna, T. M. y Oliverson, R. (1997); Hoeyland, A. y Rausand, M. (1994); Hurst, D.J. (1995).

- *Estimación de la disponibilidad total de un sistema.*

Las metodologías convencionales utilizadas son: RBD (Diagrama de Bloque de Fiabilidad), FTA, análisis de Markov, Redes Petri, entre otras. Sus detalles pueden ser consultados en muchas publicaciones: Hoeyland, A. y Rausand, M. (1994), BS5760 (Part2), IEC61025, EC61078, IEC61165, O'connor, P.D.T. (1985), Lewis, E.E. (1994).

Algunas aplicaciones pueden ser consultadas en Mitchell, B.F. y Murry, R.J. (1996); Platis, A.N., Limnios, N.E., et al. (1997); Lindqvist, B.H. y Amundrustad, H. (1998); Csen - ki, A. (1998); Keeter, B. (2002).

Análisis RAM con metodologías estructuradas en base a una combinación de los modelos convencionales:

- Modelización de la disponibilidad mediante la combinación de la modeliza – ción de Markov y las Redes Petri.(Signoret, J.P., 1998)
- Combinación de la técnica FTA y Markov. (Bouissou, M. y Bourgade, E., 1997).
- Combinación FTA y Redes de flujo.(Dougan,K.W. y Reilly,M.C., 1993)
- Andrew J.D., Moss T.R., 1993; Locks, M.O., 1995; Isograph Direct Ltd; Item soft- ware Inc. http://www. itemsoft.com.

Se puede encontrar una discusión de los pros y contras de cada una de las metodologías convencionales de modelización en IEC60300-3-1 y Hansen, G.K. (1997).

La tabla 53 es un extracto de la tabla 2 de IEC60300-3-1. La original contiene más información. Incluye observaciones y descripciones de cada item. El analista debe seleccionar el método, o combinación de métodos, que se adapten mejor a las especificidades de su sistema o los objetivos de su análisis.

Los métodos mencionados aplican no sólo para predecir la disponibilidad del sistema total de producción. También aplican a la modelización de subsistemas del sistema total o de fenómenos específicos de componentes del mismo, tales como: la degradación de componentes, la distribución de vida de un componente, el efecto de la inspección periódica de un componente, el nivel de fiabilidad de los sistemas de cierre de emergencia (ESD), etc.

Tabla 53: Características de los métodos de análisis de la disponibilidad (Extraído de la tabla 2 de IEC60300-3-1).

Analysis method	Characteristics														
	Ability of method to handle model characteristics as:								Attributes						IEC Standard
									Approach		Analysis		Analysis effort		
	Number of components	Redundant structure	Irreducible structure	Failure/event combinations and dependencies	Time varying failure/event rates	Complex maintenance strategies	Simulation of functional process	Symbolic represent-ation	deductive	inductive	qualitative	quantitative	qualitative	quantitative	
FMEA	Up to several thousands	(no)	no	(no)	yes	no	no	List	(nc)	c	c	nc	high	–	60812
FMECA	Up to several thousands	(no)	no	(no)	yes	no	no	List	nc	c	c	(c)	high	low	60812
Fault tree analysis	Up to several thousands	yes	(yes)	(yes)	yes	no	no	Fault tree	c	nc	c	c	high	medium	61025
Reliability block diagram	Up to several thousands	yes	(yes)	(yes)	(yes)	no	no	Reliability block diagram	c	nc	(c)	c	medium	medium	61078
Markov	2 to 100	yes	yes	yes	(no)	yes	(yes)	System state diagram	(nc)	c	c	c	high	medium	61165
Parts count	1 to thousands	(no)	(yes)	no	(no)	–	–	List	nc	c	(nc)	c	low	low	–
Cause/consequence	Up to several hundreds	yes	yes	(yes)	(yes)	yes	no	Cause/consequence chart	(c)	c	c	c	high	low/ high	–
Event simulation	Up to several hundreds	yes	yes	yes	yes	yes	yes	Any	c	c	c	c	high	high	–
System reduction	Up to several thousands	yes	no	(yes)	(yes)	(yes)	no	Reliability block diagram	nc	c	(nc)	c	medium	medium	–
Event tree	2 to 50	yes	yes	(yes)	yes	no	yes	Event tree	c	c	(nc)	c	low	low	–
Truth table	2 to 50	yes	yes	yes	–	–	–	Table	nc	c	c	nc	high	–	–

Notaciones: (0): con restricciones/excepciones; (nc): no aplicable; (c): aplicable.

- *Métodos aproximados para predecir la disponibilidad/fiabilidad de sistemas complejos con muchos componentes:* Aaroe,R., et al (1989), Bodsberg. L., et al, (1994), Doerre, P. (1989) estima la fiabilidad de estructuras redundantes compuestas por múltiples componentes del mismo tipo (con respecto al comportamiento al fallo) mediante un método basado en la teoría de los procesos estocásticos, Kolowrocki, K. y Kurowicka, D. (1998).

La modelización de la disponibilidad suele ser un problema bastante complejo dado que es necesario considerar aspectos tales como: la distribución del fallo, distribución del tiempo de reparación, mantenimiento preventivo, retrasos en los tiempos de mantenimiento, retrasos en los suministro. La técnica de simulación más utilizada es la de Monte Carlo.

- ***Modelización del mantenimiento y la inspección.***

La frecuencia con la que se realizan las tareas de mantenimiento e inspección influye considerablemente sobre el "rendimiento de la disponibilidad" y los costes de operación (coste hora/hombre, coste del consumo de repuestos, etc).

La "Mantenibilidad"puede ser medida a través de diferentes factores (Blanchard, B.S., et al., 1995)*:*

1) *Tiempo Medio entre Mantenimiento (MTBM).*Incluye los requerimientos tanto de preventivo como de correctivo.
2) *Tiempo Medio entre Sustitución/Reemplazo (MTBR) de un item debido a una acción de mantenimiento.*
3) *Tiempo de parada por mantenimiento (MTD: Maintenance downtime),* o tiempo total durante el cual el sistema (o producto) no está en condiciones para realizar su función proyectada. Incluye el tiempo medio necesario para reparar *(MTTR).*
4) *Turnaround time (TAT).* Es la parte del tiempo de mantenimiento que se destina a servir, reparar y /o comprobar un item para devolverlo a su función.
5) *Por el índice Horas de trabajo de mantenimiento por sistema/Horas de opera - ción en producción.*
6) *Costes de mantenimiento por sistema/Horas de operación en producción.*

Dado el efecto significativo que tiene la frecuencia y la calidad del manteni - miento y la inspección sobre el total del LCC, y en particular sobre los denominados "Costes de Propiedad (OPEX), diferentes estrategias para mejorar la eficiencia del mantenimiento, o las tareas de inspección, han sido estudiadas y estandarizadas: API RP 580/581; IEC60300-3-11; IEC60706-4; NORSOK Z-CR-008; Daugherty, G.L., 1991.

Por ejemplo, métodos como el RCM (Reliability- Centered Maintenance) y el RBI (Risk-Based Inspection) son utilizados para la planificación eficiente del manteni - miento y la inspección.

El RCM es un proceso sistemático usado para determinar lo que se debe hacer con objeto de asegurar que un activo físico continúe cumpliendo con las funciones proyectadas en un contexto de operación. (Kenna, T. M. y Oliverson, R., 1997)

El RBI es un proceso de inspección sistemática que prioriza la inspección de equipos en base a la probabilidad y las consecuencias del fallo con objeto de reducir/optimizar el potencial de fallo catastrófico en equipos, el presupuesto y el personal dedicado. Se puede consultar los estándares de requerimientos en API RP 580/581.

- ***Modelización de la logística.***

La logística puede ser medida a través de indicadores como "Soporte logístico" y la "Soportabilidad". (Followell, D.A., 1995)

Los elementos cubiertos por el modelo logístico y las medidas cuantitativas de la logística pueden variar en función del sistema logístico a ser modelado. Por tanto, resulta imposible especificar elementos y medidas generales. Como ejemplo, la guía del Soporte Logístico Integrado (ILS) del Departamento de Defensa (DOD) de USA especifica los elementos siguientes en el análisis del soporte logístico:

1. *Personal de mantenimiento.*
2. *Formación/entrenamiento y soporte a la formación/entrenamiento.*
3. *Soporte de suministro.*
4. *Equipos de apoyo/soporte.*
5. *Ordenadores.*
6. *Empaquetado, manipulación, almacenaje y transporte.*

7. *Instalaciones de mantenimiento.*
8. *Datos técnicos y sistemas de información.*

Un elemento clave en el análisis de soportabilidad es el *"Análisis del stock eco - nómico de repuestos (Sparing Analysis)"*el cual influye en los tiempos de reparación y en los costes de operación. *El "Sparing Analysis"*puede ser empleado como un indicador adelantado de la fiabilidad y revelar información relevante en conjun - ción con el número y tipología de los repuestos*:* McArthur, C.J. y Snyder, H.M., 1989; Myrick, Al., 1989; Paisie, J.E., 1998.

Se puede encontrar algunos métodos para predecir los costes de soporte en Alar - con, Jr., M.E., y Donaldson, L.M. (1979).

- ***Modelización de la "Regularidad".***

Este concepto puede ser definido como la capacidad que tiene un sistema de cumplir con la demanda de entrega o los niveles de rendimiento (NORSOK Z-016). La relación entre disponibilidad, disponibilidad de la producción y "Entregabilidad", queda establecida como sigue:

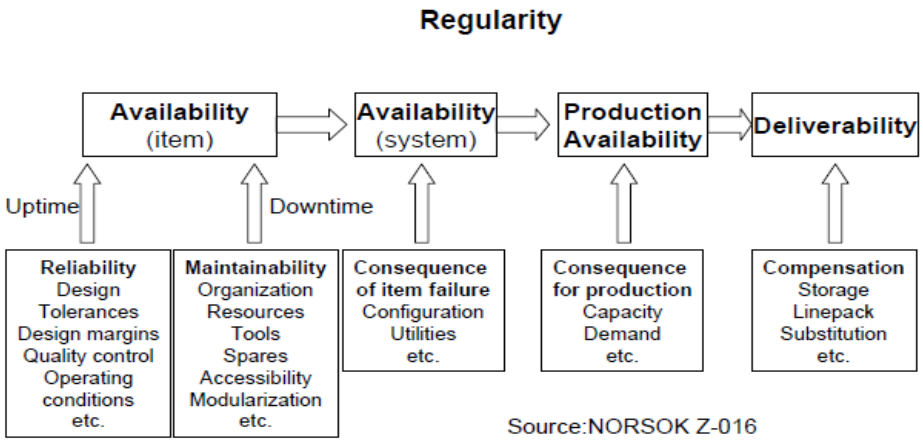


Figura 158: Medidas para la gestión de la Regularidad.

Destacan los siguientes conceptos:

- *Disponibilidad del sistema para un periodo:* uptime/tiempo de operación.
- *Disponibilidad de producción:* producción/producción planificada.

Dado que es posible considerar no solamente el sistema de producción, sino tam- bién los buffer o cualquier otro sistema de backup en caso de que la producción caiga, se prefiere medir la regularidad de un sistema por un factor llamado "Entregabilidad", el cual se define, según NORSOK Z-016, como el ratio de entregas sobre las entregas planificadas en un periodo especificado de tiempo, cuando se incluye los efectos de los elementos de compensación (los buffer o la substitución por otros productores).

Se pueden definir varias medidas para la regularidad de la producción. Por tanto, es importante definir explícitamente la medida que se utilizará en el análisis de la regularidad de acuerdo a los contenidos del contrato.

- ***Modelización del Riesgo (peligro y garantía).***

El riesgo potencial de un sistema, si se puede cuantificar, representa una infor - mación práctica y útil para la toma decisiones y la reducción de la incertidumbre en la fase de diseño y desarrollo del mismo: control del riesgo dentro de unos niveles durante la operación, gestión del riesgo a lo largo del ciclo de vida, evaluar la seguridad de un activo en la fase de adquisición. Se recomienda, para mejorar la

precisión a la hora de la selección de la solución coste efectiva cuando varias alternativas compiten entre si, incluir los costes de las garantías de desempeño y las pérdidas potenciales de sucesos accidentales en el CBS del análisis LCC.

La cuantificación del riesgo se realiza, generalmente, multiplicando la magnitud de las "consecuencias" de un accidente por la "frecuencia" con que este se produce.

Las metodologías de evaluación del riesgo fueron originalmente desarrolladas dentro de la industria nuclear. Posteriormente se extendieron a la industria espacial, plantas offshore e industrias de procesos químicos. Algunas aplicaciones, modelos para la estimación de las "consecuencias" y la "frecuencia" de sucesos peligrosos y software pueden ser consultados en Maggio, G., 1996; Oeien, K., Sklet, S., et al., 1998; EPA 40CFR68; Lees, F.P., 1996; Center for Chemical Process Safety (CCPS), 1995.

Para cuantificar el "riesgo de garantía", la consecuencia es cuantificada por el coste por reclamación y la "frecuencia" puede ser representada por el número de veces que se espera que se reclame en el periodo de la garantía. (Tripp, H. y Propst, J., 1995; Majeske, K.D. y Herrin, G.D., 1998)

- ***Modelización del error humano.***

Existen diferentes técnicas *HRQ (Human Reliability Quantification)* para la cuantificación del error humano: THERP (Technique for Human Error Rate Prediction), HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique), SLIM (Success Likehood Index), etc. Los pros y contras de las técnicas HRQ son recogidos en Kirwan, B, 1998.

- ***Modelización Impacto ambiental.***

Se utilizará las técnicas que correspondan en función a la naturaleza y las características del sistema a proyectar y el marco legal y normativo en vigor.

➢ ***Proceso 4: Recogida y análisis de datos.***

El análisis LCC exige datos. La exactitud de los datos es crucial para mejorar la certidumbre de la predicción. Para recoger los datos previamente hay que definir, con precisión, los datos de entrada y sus requerimientos. Muy frecuentemente estos datos existen (ficheros históricos de ordenador) pero no en el formato requerido.

Si el dato está disponible para cuantificar el elemento de coste del CBS, cada elemento de coste puede ser cuantificado directamente a través del modelo LCC definido. En caso contrario, los datos de los elementos de costes relevantes no disponibles pueden ser estimados o consultados a expertos.

Por lo general, los datos de detalle de los costes de operación de un activo en su etapa inicial de vida suelen ser limitados. Por este motivo, los cálculos del LCC están basados frecuentemente en costes de funcionamiento de equipos similares con historial de uso. Una importante faceta del LCC es el establecimiento de una disciplina en la rutina de monitorización de los costes de funcionamiento de un activo para posibilitar la comparación de los costes actuales con los proyectados, con el fin de:

- establecer medidas correctivas sobre desviaciones(contribución a la gestión pro – activa del mantenimiento y la operación): Optimización del ROI de la inversión.
- Configurar una base de datos de costes más completa y descriptiva para futuros estudios.
- Mejora de la toma de decisiones a nivel de operación y mantenimiento.

- ***Preparación de los datos.***

Para el análisis LCC es necesario una amplia variedad de datos: datos de fiabilidad, datos de mantenibilidad, datos de operación, datos de costes. Es relativamente

fácil encontrar fuentes que suministren datos de fiabilidad que estén disponibles al público. Lo que es difícil es encontrar las mismas fuentes para los datos de operación y de costes; estos son datos más sensibles que forman parte de la contabilidad interna de gestión de una empresa cuyo acceso suele estar muy restringido.

Para los datos de fiabilidad y mantenibilidad se dispone de las siguientes referen - cias:

1. Standards para la recogida de los datos:

- *IEC60300-3-2: Collection of dependability data from the field.*
- *ISO14224: Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment.*

2. Fuentes de datos: Eisaman, Jr., J.E., 1989; Allan, R.N., SO,T.Y.P, et al., 1989; Moss, T.R. y Sheppard G.T., 1989; Scarrone, M., Piccinini, N., et al., 1989; SINTEF Industrial Management, 1997; Coutinho, J. de S., 1979.
3. Procedimientos recogida de datos: Comer, P., 1989.

Las siguientes bases de datos de fiabilidad son accesibles al público: *OREDA Handbook (Offshore Reliability Data), IEEE Std. 500, MIL – HDBK 217F, NPRD – 91, T – Book, WASH – 1400, AIChE CCPS guidelines, EIReDA, etc.*

En relación a los datos de operación y datos de costes, indicar que en la mayoría de los casos se encuentran almacenados en base de datos internas con niveles de có - digo de acceso restringido.

- ***Estimación de los datos.***

Cuando los datos necesarios para el análisis del sistema no están disponibles estos deben ser estimados. Para estimar el valor del dato existen algunos métodos propuestos en *AE ARP-429 3(Life cycle cost - Techniques and applications):*

- *Modelos estocásticos:* tienen en cuenta la naturaleza aleatoria del suceso y aplican técnicas estadísticas apropiadas.
- *Técnicas paramétricas:* se basan en el análisis estadístico de bases históricas .Es usual en la estimación de costes o en la obtención de factores de costes.
- *Técnicas Análogas:* establece la estimación del dato actual tomando como re- ferencia datos previos similares. Para ajustar los datos previos a las características de los datos en análisis se recurre al juicio de expertos.

Para la estimación de los datos de fiabilidad han sido desarrolladas técnicas como las que se recogen el los siguientes documentos: Denson, W.K. y Keene, S., 1998; Chan, C.K., Saraidaridis, C.I., et al., 1997; Grabski, F., 1998; Hoeyland, A. y Rausand, M., 1994.

El artículo de *Hokstad, P. y Jensen R. (1998)* discute sobre la diferencia entre los datos reales y los pronosticados de fiabilidad. Establece como las seis causas prin - cipales que justifican la diferencia las siguientes:

1. *La precisión del dato.*
2. *La técnica/método de predicción.*
3. *Factores ambientales/entorno.*
4. *Procesos de fabricación.*
5. *Factores relacionados con el diseño.*
6. *Factores relacionados con la gestión a corto plazo.*

Para el análisis de los costes hay tres técnicas básicas:

- *Método de Costes de Ingeniería.* Este método se usa cuando existen registros detallados de capital y operación del activo. Se consideran los elementos individuales de coste de cada componente del activo en estudio.
- *Método del Costes Análogo.* Suministra el mismo nivel de detalle

que el método anterior, pero utiliza una base de datos histórica de un activo análogo al del estudio, en términos de dimensión, tecnología, aplicación, etc.

- *Método de Costes Paramétrico* .Se utiliza cuando se disponen de da - tos precisos de parámetros específicos que son de interés para el estudio. Se aplica una variedad de herramientas matemáticas (progresión, análisis de regresión, etc.) a los datos conocidos con objeto de proyectar los costes del activo en estudio.

➢ ***Proceso 5: Desarrollo de la estructura / perfil de costes.***

- ***Modelización de la "función coste del análisis LCC".***

Es importante contar con un modelo financiero para establecer un marco de trabajo que permita el análisis de los datos asociados al estudio. A veces es posible validar el modelo a través del uso de datos históricos. Para estudios simples basta con una sencilla hoja de cálculo o un libro de trabajo. Para estudios más complejos están disponibles en el mercado paquetes comerciales.

Uno de los principales objetivos del análisis LCC es el *"Affordability Analisys (Análisis de asequibilidad)"* considerando la planificación financiera a largo plazo. Una información clave para este tipo de análisis es el *"perfil de costes del ciclo total de vida"*. La construcción de la gráfica del perfil de costes para el ciclo de vida total del sistema representa uno de los procesos esenciales en el análisis LCC, tanto para la referencia tomada como punto de base para comparar (línea base o de referencia) como para las alternativas a evaluar. Ello permite la evaluación, a nivel financiero, de cada diseño con la referencia tomada como base. Para poder dibujar esta gráfica es necesario disponer de una tabla de datos discretos que recoja los valores de cada uno de los elementos de costes identificados en el CBS o tener modelizada la función coste. La figura 159 ilustra un ejemplo de los perfiles de costes:

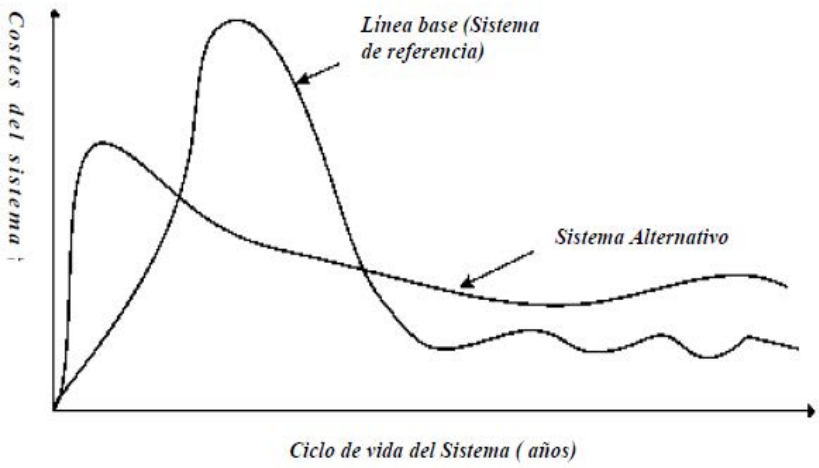


Figura 159: Comparación de los perfiles de costes del sistema de referencia con un sistema alternativo.

- ***Modelo de funcionamiento/marcha.***

El perfil de costes de funcionamiento se obtiene introduciendo los datos de entrada obtenidos en la fase de operación en el modelo de costes de funcionamiento desarrollado en el análisis LCC. Dependiendo de la complejidad del sistema, puede obtenerse a través de una simple hoja de cálculo o a través de programas comer - ciales dedicados.

- ***Adaptación de los datos de costes.***

Para la valoración a nivel financiero es necesario considerar los efectos de la inflación, las tasas de interés, tasas de cambio, impuestos, depreciación, etc. Sin em - bargo, y debido a la dificultad de predecir de forma exacta las tasas de inflación y de cambio, el perfil de costes puede ser calculado sobre una base de "precio constante" (IEC60300-3-3: Life cycle costing). Es importante comparar las alternativas tomando como referencia una línea base común.

- ***Kit básico de herramientas.***

1. Descuento (Discounting).

En estos estudios destaca un procedimiento denominado discounting (descuento) que permite realizar una comparación más exacta/precisa. Este procedimiento lo que hace es reducir/minorar el coste proyectado (recibo) por un factor que está tabulado en una tabla de doble entrada (número de años de tiempo de vida considerado para el activo y la revalorización anual considerada). Representa justamente el concepto opuesto/inverso al de capitalización de la inversión a un tipo de interés establecido anual. Se calcula dividiendo el valor actual entre el valor a futuro (por ejemplo, = 1,10 * valor actual, para una revalorización del 10% anual) multiplicado por 100. Este factor no debe ser confundido con el término de inflación, efecto que no suele considerarse en los estudios de LCC.

2. NPV (Valor Neto Presente).

La evaluación de la efectividad de un activo puede requerir, a veces, un procedi - miento detallado de contabilidad para evaluar los efectos del rendimiento proyectado sobre los ingresos futuros (cash flow). El *NPV* permite calcular el valor actual de un cash flow futuro:

$$N\,P\,V = \sum_{n=0}^{T} C_n\,(1+X)^{-n} \quad \textbf{(67)}$$

donde:

- *NPV: Valor Neto Presente de un cash flow futuro.*
- C_n *: cash flow nominal en el año n.*
- *X: tasa de descuento.*
- *T: el tiempo considerado, en años.*

Esta herramienta permite comparar los costes actuales para emprender un pro - yecto versus el potencial de beneficios (en nuestro caso ingresos) exigidos a futuro. Hay muchos factores que deben ser contemplados a la hora de evaluar las inversiones en un proyecto: impuestos y autorizaciones; nivel de depreciación; tendencias de futuro; otros.

Para una información más detallada es conveniente consultar textos especializa - dos en el tema *(www.macroanalytics.com).*

3. Escalating.

Toma en consideración los cambios (aumento) en el precio con el tiempo:

$$E\,F = (1+E_1)\;x\;(1+E_2)\;x\,(1+E_3)\,x\ldots x\;(1+E_n) \quad \textbf{(68)}$$

donde:

- *EF: factor de escala en n años.*
- E_i *: ratio de escala en el i- ésimo año.*

Un tema de interés es descubrir, analizar y ponderar los factores que influyen en el escalado del precio.

➢ ***Proceso 6: Evaluación.***

Es la fase de selección de la configuración del sistema que mejor se ajuste, de entre las alternativas analizadas, al sistema tomado como referencia (sistema base). Durante el proceso de análisis se debe comprobar que los sistemas (ya sea el base o una alternativa) cumplen con los criterios (condiciones de contorno) identificadas en el proceso 1 del análisis.

Durante el proceso de evaluación es muy importante considerar la incertidumbre de los datos de entrada y los resultados de los estudios de sensibilidad asociados a las diferentes alternativas.

En esta etapa es donde se realizaría también el *análisis de escalabilidad* en función de las restricciones contempladas y los escenarios proyectados.

- ***Kit básico de herramientas.***

En muchos casos, un estudio particular de LCC puede utilizar una combinación o todos los métodos reseñados para obtener los resultados finales. En cualquier caso, es importante tener en cuenta que se trata de una actividad multidisciplinar donde el analista debe estar familiarizado con la filosofía que apuntala el método, incluyendo una comprensión de:

- Elementos de costes
- Fuentes de datos
- Principios financieros
- Métodos de evaluación de la incertidumbre.

Igualmente, se ha de manejar un conjunto de herramientas matemáticas entre las que cabe destacar:

- Técnicas de análisis estadístico (por ejemplo, análisis de regresión).
- Técnicas de simulación (simulación por Monte Carlo), cuando existe aleato – riedad en los datos disponibles.

1. Análisis de sensibilidad.

Uno de los objetivos básicos de este análisis es identificar los factores de mayor peso en la estructura de costes (factores que más contribuyen a los altos costes). Se utiliza para investigar el impacto que tiene una variación en los parámetros de entrada sobre el resultado final para observar los efectos de los trade-offs sobre el coste. La información resultante revela los principales conductores de costes (y de ingresos) en el CBS, lo que permite una localización más efectiva de las alternativas.

Para realizar este análisis han sido desarrollados diferentes métodos, los cuales son adaptados a las aplicaciones particulares en estudio. (Marseguerra, M., Padovani, E, et al., 1998)

En general, existen dos formas básicas de realizar el análisis (Bertini, S., Fracchia, M., et al., 1998)*:*

- *Enfoque determinista.* Calcula la derivada parcial de los "índices de Perfor - mance- desempeño (PI´s)" utilizados en el análisis LCC (medidas del performance del RAM, medida de LCC, etc.) con respecto a cada uno de los parámetros/variables independientes a analizar (índice de fallos, etc.). De este modo se cuantifica la varia - ción de esos índices ante una variación de la variable/factor en estudio en el rango de fluctuación establecido. Este método permite:

a. identificar el peso (razón de cambio instantánea o variación marginal) que

tiene, en el rango de variación considerado, cada una de las variables independientes sobre el comportamiento del IP.

b. Disponer de la velocidad de cambio (razón de cambio medio) de dicho índi - ce con respecto a cada uno de las variables que lo controlan.

Esta aproximación sólo puede ser aplicable a sistemas simples con pocos parámetros.

- *Enfoque estocástico.* Estima las *"probabilistics properties"* de los *"índices de performance"* contra las posible distribuciones estadística de los parámetros. La aproximación estocástica puede ser realizada utilizando simulación por Monte Carlo. Esta aproximación puede ser aplicable a sistemas complejos con muchos parámetros.

2. Análisis de incertidumbre.

Este análisis brinda mayor confianza al decidor a la hora de establecer las valoraciones sobre las alternativas. Las fuentes de incertidumbres se pueden clasi - ficar básicamente en tres tipos: incertidumbre en los parámetros; incertidumbre en el modelo e incertidumbre completa.

Metodologías y casos de estudio pueden ser consultadas en Kortner, H., 1989; Goossens, L.H.J., Kraan, B.C., et al., 1998; Porn, K., 1998.

3. Identificación de los conductores de costes (cost drivers) y análisis de la relación causa - efecto.

La identificación de los conductores de costes que tienen impacto sobre el LLC total y sus relaciones causa - efecto son claves para orientar las acciones de mejora coste efectivo en el sistema. Por ejemplo, las causas pueden ser una alta frecuencia de fallos de un equipo o el alto consumo de energía en un subsistema. La modificación de estas causas, en base a los cost drivers identificados y las relaciones causa – efecto asociadas, permite reducir el LLC del sistema.

4. Análisis de la Efectividad del sistema: Efectividad vs. LCC.

La *Efectividad* se define como una medida combinada de la disponibilidad (resultado de la fiabilidad y la mantenibilidad), el índice de calidad y el índice de funcionamiento.

El *Índice de Calidad* representa la proporción de buenos productos (de acuerdo a las directrices de calidad) frente a los productos rechazados.

Por su parte, el *Índice de funcionamiento,* representa la relación entre la veloci - dad actual y la velocidad máxima de producción.

Uno de los objetivos básicos del LCC es permitir comparar los efectos de varios cursos de acciones. Una de estas acciones puede ser decidir una compra o inversión, pero puede ser igualmente efectivo en la evaluación de los efectos de diferentes regímenes o políticas de mantenimiento.

Típicamente la comparación implica comparar coste con valor añadido. La clave está en encontrar una manera de evaluar la efectividad de una opción.

El cálculo de la Efectividad del sistema proporciona un valor numérico intere - sante para comparar diferentes alternativas. Para visualizar mejor los trade-off entre efectividad y LCC, para diferentes opciones, es preferible la representación gráfica:

Figura 160: Comparación de la efectividad de sistemas.

5. Análisis de Pareto *(Relación 80/20).*

Es muy útil en los estudios LCC. Este análisis parte de la premisa de que el 80% de los problemas son debidos al 20% de las posibles causas (Relación 80/20). En el contexto LCC, esto sugiere que quizás el 80% del Coste del Ciclo de Vida total de un activo se deba al 20% de los elementos de coste. Esta premisa puede ser de gran ayuda para identificar los "conductores de costes" y los KPI´s que deberían ser tenidos en cuenta para monitorear la evolución de un proyecto en la fase de operación.

De igual manera, la comparación de los gráficos de Pareto para el estudio de diferentes opciones puede ser de gran valor para estimar los riesgos asociados a cada opción:

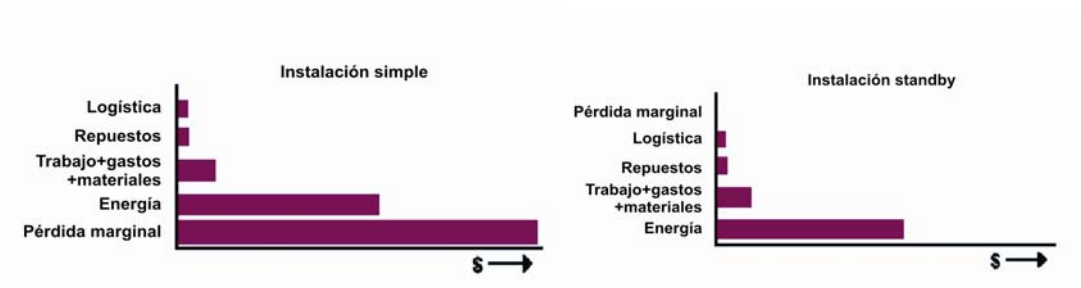


Figura 161: Gráfico de Pareto para la comparación de los costes de un sistema de bomba simple o doble (bomba en standby).

- ***Monitorización de los costes del LCC.***

Una vez realizado el estudio, es conveniente aplicar una disciplina dentro del sistema para monitorizar la estructura de costes de la solución adoptada una vez implementada. Esta monitorización será muy útil para disponer de datos objetivos (reales) que nos permitan:

- Validar los resultados del estudio.
- Establecer "alertas tempranas" que permitan detectar desviaciones sobre el rendimiento esperado.
- Actualizar los datos de cálculo del LCC mejorando, por iteración, la precisión de los resultados; contribuirá a mejorar la calidad de determinadas decisiones como: estimación de reemplazamiento la planificación y programación del mantenimiento.

El proceso de monitorización brinda la oportunidad de introducir las acciones correctivas apropiadas, de forma proactiva, ante desviaciones en los resultados esperados ("alertas tempranas") lo cual permitirá optimizar el ROI. Este proceso contribuirá también a construir una base de datos de calidad y gran valor para la toma de decisiones informada y estudios futuros.

- ***Optimización. Ayuda Multicriterio a la Decisión.***

Los procesos anteriores tienen como finalidad definir o diseñar el modelo del sistema en estudio. Esta fase tiene por objeto definir el método de optimización más apropiado para que sea eficiente y efectivo (a nivel interno).

La primera iteración de los diferentes procesos del análisis LCC brinda como salida la/s alternativa/s más deseable/s (línea base y alternativas). La aproximación brindada será función de:

- la información disponible,
- el grado de precisión requerido,
- la sensibilidad del problema a los datos,

- y del ahorro (normalmente en tiempo y esfuerzo) que se puede conseguir con la aproximación.

Las función/es de restricción (condiciones de convergencia o contorno) vendrán definidas, para cada iteración, en el proceso 1, donde se definen las condiciones ac - tualizadas para las diferentes funciones del negocio (O&M, financiera, marketing, etc.) que han de verificar las alternativas (outputs). En un sentido amplio, el proceso de optimización busca un conjunto de parámetros que minimicen el LCC del sistema total; en un sentido más estricto, la optimización puede ser aplicada a actividades específicas en el proceso LCC, tales como: la optimización del diseño, optimización del mantenimiento, optimización de los repuestos. Algunas metodologías para los casos citados pueden ser consultadas en las siguientes referencias:

- Optimización del diseño: Coit, D.W. y Smith, A.E., 1997; Joyce, P.A., Withers, T.A, et al., 1998; Vassiliadis, C.G. y Pistikopoulos, E.N., 1998.
- Optimización del mantenimiento: Vassiliadis, C.G. y Pistikopoulos, E.N., 1998; Susova, G.M. y Petrov, A.N., 1997.
- Optimización de los repuestos: Fabbro, R.M., 1979; Witt, J.H., 1990.

Esta fase se orienta:

- A la búsqueda de óptimos globales donde puede existir más de un objetivo normalmente en conflicto (aumentar la fiabilidad del sistema, aumentar la capacidad de producción, reducir los costes de producción, reducir los costes de mantenimiento, aumentar la calidad del producto, disminuir los tiempos de entrega, aumentar los beneficios).
- La búsqueda de alternativas “altamente optimizadas”. Estas alternativas pueden estar en conflicto y el decidor está altamente interesado en contar con una herramienta que le apoye, con base científica, en la optimización global y/o la toma de decisiones.
- Brindar diseños óptimos y no solamente adecuados.

Los problemas a resolver serán, generalmente, Problemas de Optimización Multi objetivo *(POM)* para la Ayuda Multicriterio a la Decisión *(AMD)* donde aplicarán Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo *(AEMO).*

En la práctica, según Salazar, D., Carrasquero, Galván, B., 2005, cualquier AEMO está embebido en un proceso de toma de decisiones compuesto de tres fases:

- el Modelo de Toma de Decisión,
- la Optimización Evolutiva Multiobjetivo *(OEM)* y
- la Toma de decisiones.

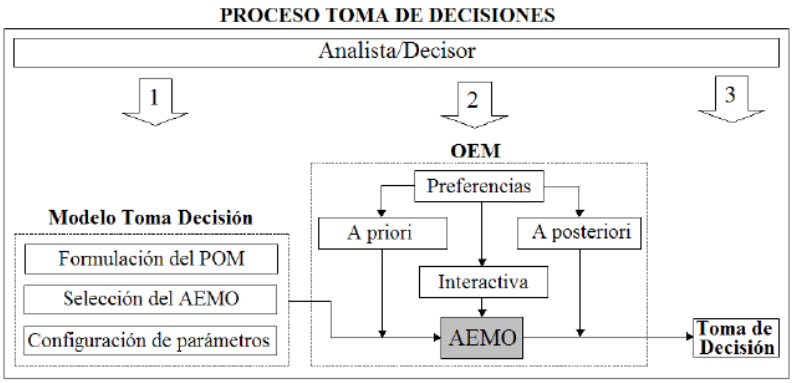


Figura 162: Proceso de decisión y AEMOs según Salazar et al., 2005.

- ***Informe del análisis. Estructura y objetivos básicos.***

De acuerdo con el estándar internacional IEC60300-3-3 es obligatorio la documentación de los resultados del análisis LCC. Según este estándar, el informe debe estar formado por los siguientes elementos:

- *Resumen ejecutivo.* Es un documento para brindar una información general al analista y otros grupos de interés (breve sipnosis de los objetivos, resultados, conclusiones y principales recomendaciones).
- *Propósito y alcance.* Descripción de los objetivos del análisis, descripción de los Productos (operación, escenarios posibles, entorno de usos, etc.); supuestos, restricciones, limitaciones, alternativas.
- *Descripción del modelo LCC.* Resumen del modelo LCC, incluyendo los supuestos pertinentes, una representación de la estructura de LCC, explicación de los elementos de coste y la forma en que fueron estimados y una descripción de la forma en que los elementos de costes son integrados.
- *Análisis del modelo.* Presentación de los resultados del modelo, incluyendo la identificación de los "conductores de costes",los resultados del análisis de sensibilidad y de cualquier otro análisis de interés realizado.
- *Discusión.* Interpretación de los resultados del análisis. Incluye el análisis de las incertidumbres en los resultados y cualquier aspecto que contribuya a apoyar al analista en la toma de decisiones, la comprensión y uso de los resultados.
- *Conclusiones y recomendaciones.* Presentación de las conclusiones, lista de recomendaciones e identificación de necesidades (necesidad de ampliación del análisis, revisiones,...)

El objetivo principal será brindar al analista información relevante, oportuna, clara, fiable y precisa, que permita la simulación de escenarios técnico-económicos para dos fines básicos:

a) investigar, comparar , innovar y diseñar configuraciones : obtener alternativas STM+C.

b) Seleccionar la configuración STM+C óptima en base al mejor equilibrio entre la componente de valor y de coste total para el ciclo de vida establecido.

Para el caso de contratos integrados, además, serán necesarios dos elementos claves:

1) las "Guías de Requerimiento de Servicios" y las "Guías de Planificación" como documentos de referencia para el desarrollo del programa de preventivo. En nuestro modelo, la verdadera planificación no comenzaría con el enfoque tradicional (reactivo) de planificación y programación de los trabajos de preventivo. El concepto se ampliaría (enfoque proactivo) para iniciarla con el análisis de las necesidades de mantenimiento esperadas ("Guías de Requerimiento de Servicios") y la planificación de los recursos necesarios, especialmente humanos ("Guías de Planificación"). Estas guías serían documentos de referencia para el desarrollo realista del programa de mantenimiento preventivo.

2) Las ecuaciones de compensación en base a las garantías de desempeño.

El resultado de este proceso ha de ser un informe muy detallado de alternativas coste - efectivas (Alternativas STM+C) el cual incluiría características técnicas, de operación, mantenimiento y de coste total para cada alternativa.

La STM+C ha de ser documentada a nivel de disponibilidad, política de mantenimiento, riesgo específico, costes diferidos (penalizaciones) y coste total.

Otros resultados posibles serían: la definición de la estrategia de negociación con el cliente en el perfeccionamiento del contrato en la fase de adjudicación; la defini - ción rigurosa y realista de los elementos y condiciones claves en la redacción del contrato en la fase de concurso.

La información funcional del sistema, subsistema y sus componentes será utili - zada para apoyar (baseline) la definición y cuantificación de los recursos requeridos en el Nivel 2 (hardware, software, personal, datos, etc.)

2.2. Timing: ¿Cuándo realizar el análisis LCC?

La figura 163 muestra los perfiles típicos de costes planificados y de gastos realizados en las diferentes fases del programa. También muestra el rango de incertidumbre en la predicción de los costes.

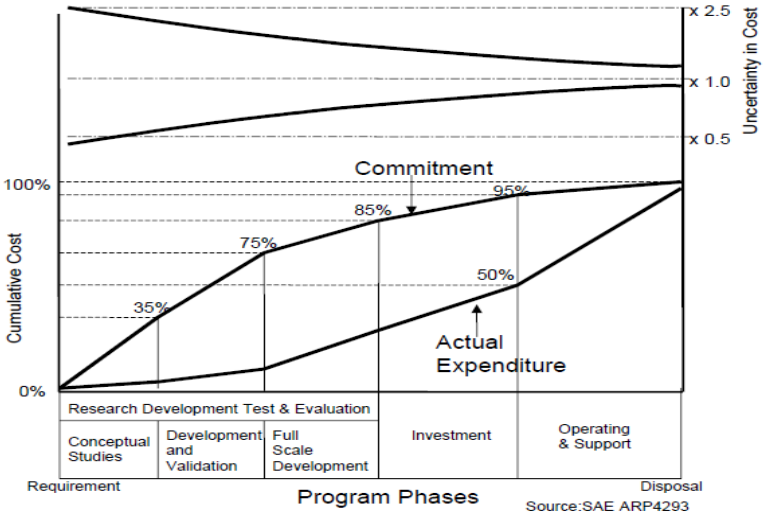


Figura 163: Ejemplo de la relación entre el perfil de costes proyectados - gastos realizados - incertidumbre sobre el LCC (Kawauchi, Y., Rausand, M., 1999).

La figura muestra que si el análisis se realiza en la etapa inicial del proyecto se obtienen, como ventajas básicas:

- *Minimizar el LCC.* Como se observa en la figura, la curva de costes planificados aumenta rápidamente en las fases iniciales. La creencia generalizada es que el 80% del LCC se corresponde con las decisiones tomadas dentro del primer 20% de vida del proyecto.
- *Apoyar de forma informada la toma de decisiones.* La identificación *"temprana"* de la estructura total de costes asociada al proyecto en estudio, el análisis de sus elementos, y la modelización de las funciones relevantes permitirá realizar, a priori, un *"*"*estudio de equilibrado"* del rendimiento, la fiabilidad, los requerimientos de mantenimiento, otros.

Sin embargo, también hay que considerar la incertidumbre del *LCC- estimado* en cada fase. Es evidente, y así lo recoge la figura, la incertidumbre del análisis será mayor en las fases iniciales (estudio conceptual) que en fases más avanzadas, donde ya existe experiencia desarrollada. El nivel de incertidumbre dependerá de la dispo - bilidad de bases de datos relevantes y reales que soporten las hipótesis de trabajo.

Por tanto, un aspecto importante a tener en cuenta es decidir el mejor momento para realizar el análisis para cada programa en función del trade-off entre el perfil de costes proyectado y la curva de incertidumbre.

3. RELACIÓN MANTENIMIENTO – LCC.

La experiencia obtenida de la aplicación de la técnica del LCC durante los últimos 40 años demuestra que el 70%, o más, de los gastos de operación y los asociados a la falta de fiabilidad son comprometidos en las etapas de concepción y diseño del proyecto. La posibilidad de influir sobre estos costes se ve enormemente reducida una vez que el proyecto se ejecuta y pone en funcionamiento. El desequilibrio existente entre los Costes de Adquisición y Sostenimiento demuestra claramente la conveniencia de implicar/comprometer al personal que gestiona el mantenimiento en las etapas iniciales de concepción y diseño de los procesos.

El análisis brindado en esta primera fase (estudio LCC) da, a los gestores de mantenimiento, la posibilidad de preparar especificaciones optimizadas para los nuevos equipos y sistemas. La identificación "temprana" de la estructura total de costes asociada al proyecto en estudio, el análisis de sus elementos, y la modelización de las funciones relevantes permitirá realizar, a priori, un "estudio de equilibrado" del rendimiento, la fiabilidad, la mantenibilidad y los requerimientos de mantenimiento. Por tanto, el estudio LCC da la oportunidad de:

- Alinear los intereses a nivel estratégico, táctico y operativo.
- Implicar a operación y mantenimiento en los procesos de adquisición. Ello brinda igualmente la posibilidad de disponer de datos cuantitativos relevantes para soportar, de forma informada y científica, la toma de decisiones en los procesos de búsqueda de óptimos globales en fases posteriores.
- Disponer de una "hoja de ruta" o "mapa de proceso" que permita extraer, en base al consenso de los agentes responsables de su cumplimiento, los ratios y los clusters de ratios para la gestión. El análisis detallado de los elementos de costes del Árbol de Costes de Sostenibilidad permite a los ingenieros y gerente de mantenimiento identificar los inductores de costes críticos (o los inductores de ingresos críticos) cuyo control resulta esencial para alcanzar los resultados establecidos.
- Fijar las tolerancias, y por tanto, los niveles de desviación admisibles para la consecución de los resultados.
- Fijar los niveles de" alerta temprana" y definir los planes de actuación para corregir las desviaciones detectadas.
- Generar una base de datos relevantes que orienten la toma de decisiones a futuro.

ANEXO V

DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES Y TAREAS BÁSICAS PARA EL DESARROLLO DE LA PLATAFORMA CIENTÍFICO - TÉCNICA DEL SISTEMA AVANZADO DE PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO.

1. FUNCIONES BÁSICAS DEL S.I..

El objetivo del Sistema de Información para la gestión del mantenimiento será proporcionar, a la dirección correspondiente, un medio de análisis para la optimiza - ción de la gestión y ayuda a la toma de decisiones a nivel estratégico, táctico y ope - rativo. Debe ser compatible e integrable con los restantes subsistemas de información del sistema técnico. Ha de cubrir las siguientes funciones básicas:

- *Captura y tratamiento de información.*

La información descriptiva, no clasificada según algún criterio(al que corresponderán los códigos), será muy difícil de tratar a la hora de establecer medidas, comparaciones, etc. Sólo se puede tratar informáticamente aquello que está codificado.

Las funciones básicas para construcción del Sistema de Información para el mantenimiento son:

- Codificación y tratamiento de las causas de intervención y tipos de trabajo, etc.
- Codificación de instalaciones, dispositivos y elementos sin perder de vista su estructura y su relación con la distribución en planta.
- Codificación clara y unitaria de las entradas de datos.
- Captura on-line mediante sistemas automáticos y monitorización de parámetros, etc.
- Proporcionar ayuda a nivel operativo (base del conocimiento).
- Gestión de archivo histórico de maquinaria, desde el punto de vista de las operaciones de mantenimiento.
- Elaboración de un “Banco o Base de conocimientos” a partir del histórico anterior y de la codificación síntoma + causa + solución (Sistema experto).
- A nivel operativo, ayuda al mantenimiento mediante programa de diagnóstico de averías y sistema de apoyo a la toma de decisiones técnicas. Este punto es consecuencia del sistema experto.
- Proveer herramientas de planificación y programación del trabajo y la planificación estratégica del Departamento de Mantenimiento.
- Determinación de parámetros de gestión del mantenimiento: MTBF, tiempo estándar de intervención, para cada elemento o instalación.
- Clasificación ABC de instalaciones referidas a su mantenimiento. El criterio de evaluación puede ser simple, considerando una sola variable (por ejemplo, la incidencia en el departamento de mantenimiento estrictamente); o por el contrario, multivariable, considerando el punto de vista de la incidencia en Producción, Seguridad,…en forma aislada, o combinada, con el criterio de ponderación que se estime oportuno.
- Procedimiento de ayuda a la planificación mensual, proporcionando un sistema dinámico y flexible (adaptativo). Es importante que esta planificación no se convierta en una servidumbre para la planificación real. Es frecuente el diseño de sistemas de planificación que sistemáticamente no se cumplen y, sin embargo, obligan a alimentar continuamente al sistema de información y gestionar los datos sin ninguna otra utilidad y realidad que satisfacer los requerimientos del sistema. Esta falta de flexibilidad y adaptabilidad debe evitarse.
- Dotar de procedimientos para autocontrol y mejora continua del mante - nimiento.

- Procedimientos de evaluación del mantenimiento mediante verificación de medidas que determinen el funcionamiento del sistema. Utilización de ratios que permitan comparaciones tanto a nivel interno como con otras empresas.
- Implementación del ciclo de Deming (Mejora continua).
- Integración con los restantes subsistemas de información, sistemas informáti - cos, equipos y aplicaciones.
- Elaboración de base de datos para el mantenimiento preventivo y planifica - ción del mismo, conectado con la Gestión de Compras, Personal, Contabili - dad de Costos y Producción, unificando las correspondientes codifi- caciones.
- Conexión con la mecanización de capturas de datos en planta (Sistema de Control de Presencia y Producción,…).
- Conexión de la base de datos documental de mantenimiento con la base de datos documental general.
- Completa integración en la organización general del sistema técnico.

2. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL Y ORGÁNICA.

Se exponen las bases para el proyecto de S.I.. Indicar que muchas de las cuestiones deben ser discutidas y aclaradas en planta.

a. Terminología.

Es conveniente emplear la normativa aceptada en los diversos sectores, la cual estará adaptada a la Directiva Comunitaria aprobada y que se extenderá a todos los países miembros.

b. Esquema modular general

El esquema general propuesto para el S.I. sería (figura 164):

- *Orden de trabajo (OT).*

La OT es el vehículo portador de la información básica involucrada en las decisiones a nivel operativo. Representa el corazón de las entradas al sistema a partir de la cual se alimentarán las bases de datos y sistema experto.

La OT no tiene por qué presentar el mismo formato para todas las tareas de mantenimiento. En algunos casos podrá ser lo más conveniente, pero en la mayoría, será necesario elaborar variantes para necesidades concretas (inspecciones, lubrica - ción, resultado de ciertas monitorizaciones, etc.)

Toda acción operativa de mantenimiento, de cualquier tipo, está o debe estar soportada por una orden de trabajo que recoja los datos para la realimentación del sistema; es decir, la OT debe contener, entre otra información: síntoma (codificado al generar la OT), causa y solución (codificados una vez ejecutada la OT).

La OT será generada cada vez que se realicen operaciones de mantenimiento correctivo (planificado o no), preventivo (planes cíclicos o no) y operaciones de apoyo a otros departamentos (producción, montajes, métodos, etc.)

- *Planificación.*

El módulo de planificación determinará las necesidades de recursos teniendo en cuenta la organización interna: humanos, materiales, equipos, etc.

La planificación se establecerá en función del conjunto de actividades pendientes, las cuales estarán recogidas en las OTs pendientes de ejecución, que es la información que dará soporte al módulo de planificación.

El horizonte de esta planificación es el corto plazo. Su objetivo es el estableci - miento coordinado de la carga mensual de trabajo (programación).

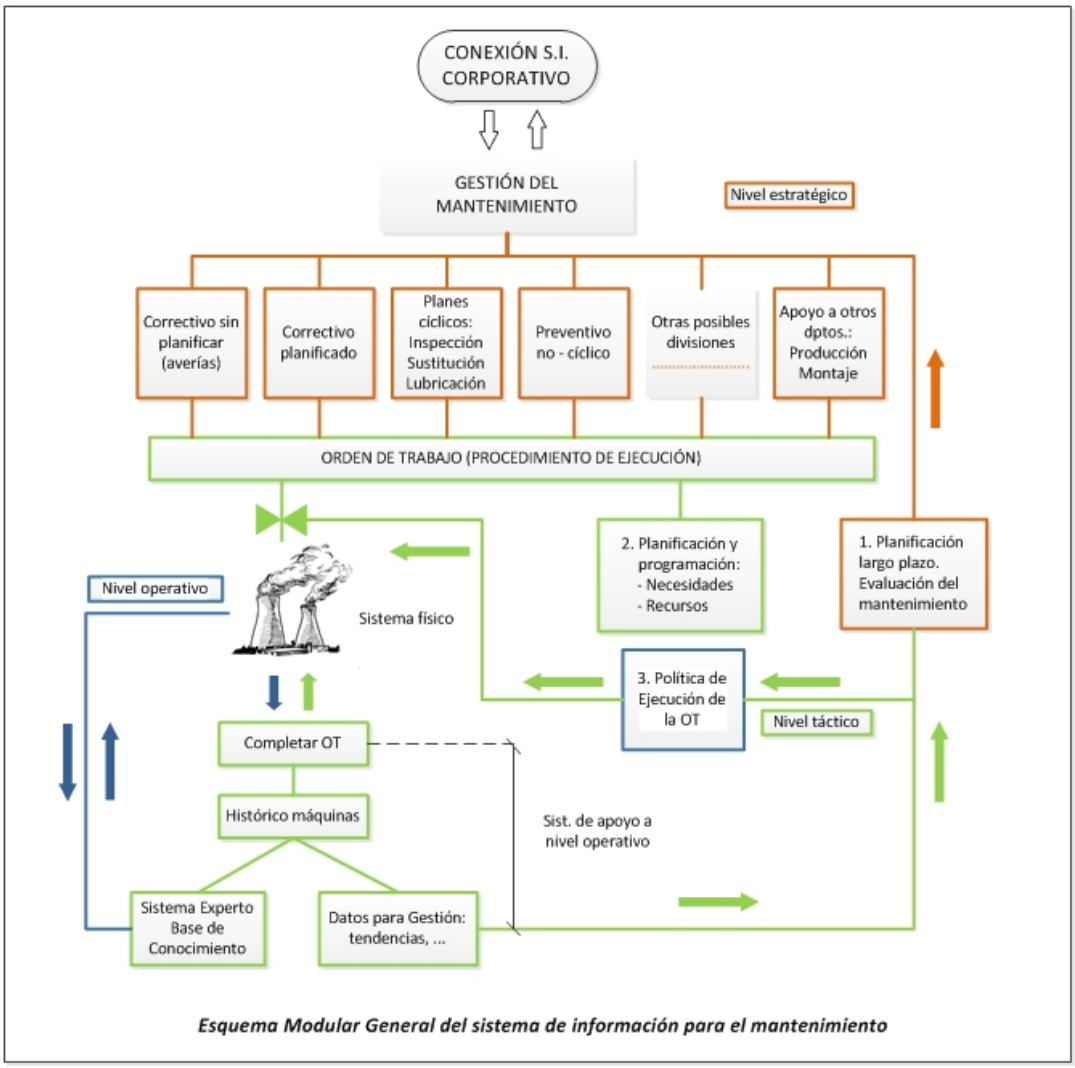


Figura 164: Esquema modular general del S.I. para el mantenimiento.

- *Programación (carga mensual de trabajo): multivariable, multicriterio.*

La carga mensual se computa teniendo en cuenta varias variables: urgencia, capacidades de los recursos humanos disponibles, entre otras. Se ordena con arreglo a varios criterios: tipo de mantenimiento, grupo, etc.

- *Recursos necesarios.*

A partir de la programación se establece el inventario mínimo conveniente:

- Inventario de repuestos, accesorios y abastecimientos.
- RRHH, tipo de trabajadores (especialidades, internos, externos,…) y cantidad.
- Previsión de gastos de subcontratación.
- Horas de parada de máquina para la intervención (coordinación con producción).

Esta información establece conexión con el subsistema de gestión de aprovisio - namiento, RRHH, producción, tesorería, etc.

Este módulo alimenta al de procedimientos de ejecución de OTs, junto con los datos de tendencias, tiempos medios entre fallos, valores estándar de ejecución de intervenciones, etc. Esta información realimenta la información a nivel táctico de mantenimiento.

- *Histórico.*

Este módulo gestiona los archivos de intervenciones. Estos pueden estar agrupados por instalación, elemento, centro de costo, etc.

Se recogen datos tales como síntoma, causa y solución, datos económicos, de materiales, tomados de la OT al finalizar la intervención

Esta información alimenta:

- al sistema experto proporcionando nueva información para aumentar su base de conocimiento.
- Al módulo de datos para gestión.

Representa el punto de arranque para realimentar al sistema.

- *Sistema experto de apoyo a la toma de decisiones a nivel operativo. Primer bucle de alimentación del sistema.*

Este módulo tiene por objeto fundamental proporcionar ayuda, a nivel operativo, apoyando a los operarios en la diagnosis de las posibles causas de avería.

Constituye, por lo tanto, realimentación a nivel operativo.

- *Datos para gestión. Segundo y tercer bucle de alimentación.*

En este módulo se obtiene información para ser utilizada a nivel táctico y estratégico: variables de control, variables para la asignación de costes, ajustes de estándares, tiempos medios entre fallos, tendencias, puntos débiles, etc.

En el nivel táctico, alimenta a los procedimientos y criterios para la adjudicación de OTs (segundo bucle de retroalimentación).

En el nivel estratégico, realimenta al módulo de evaluación del mantenimiento y a la planificación a largo plazo (tercer bucle de realimentación).

Estos bucles de realimentación permiten cerrar el ciclo de mejora continua en los tres niveles que opera el sistema (operativo, táctico y estratégico).

- *Conexión con el S.I. de planta o Corporativo.*

Finalmente, debe considerarse las salidas proporcionadas por el S.I. del Mantenimiento para alimentar otras partes del sistema de información de planta o de gestión a nivel corporativo.

3. ARQUITECTURA MODULAR DE LA ESTRUCTURA DE CONTROL. DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES.

En este apartado se describen las actividades y tareas básicas, clasificadas por afinidad, asociadas a la arquitectura modular de la estructura de control. Se centra en los aspectos científico-técnicos.

ÁREA DE ACTUACIÓN 1: Ingeniería de fiabilidad de materiales, equipos y sistemas.

1.4. Modelización del comportamiento normal.

Los principales objetivos de esta actividad serían:

1- Desarrollo de los modelos de simulación (modelos físico-operativo) del comportamiento de los equipos objeto de estudio para su posterior aplicación en la detección de malfuncionamientos y diagnosis de fallos. Las tareas básicas a desarrollar serían:

. A nivel experimental, realizar el estudio de las leyes físicas que gobiernan los distintos funcionamientos de los equipos y la determinación de los parámetros físicos.

. La construcción del modelo se realizaría resolviendo las ecuaciones físicas planteadas, estimando los parámetros físicos a partir de datos experimentales, o bien estimando la estructura del modelo a partir de señales de entrada y salida al sistema.

. Caracterización de las variables que intervienen en la creación de los modelos de comportamiento normal. Habrá que realizar un análisis de los principales rasgos característicos de las variables que participan en los modelos de comportamiento normal para la detección temprana de modos de fallo. Se aplicarían diversas técnicas de tipo matemático con objeto de asegurar la bondad de las variables a usar en el modelado.
. Construcción de los modelos de comportamiento normal para la detección de los modos de fallo establecidos.
2- Desarrollo de modelos de comportamiento económico, de rentabilidad en explotación y de disponibilidad requeridos por el Sistema Avanzado de Planificación del Mantenimiento. Las tareas básicas vinculadas serían:
. Estudio y elaboración de *modelos de comportamiento económico* necesarios para los procesos de toma de decisiones: modelo de impacto sobre el plan de negocio y modelo de rentabilidad en explotación.
. Estudio y elaboración de *modelos de disponibilidad a nivel de sistema (*conjunto de equipos) necesarios para los procesos de toma de decisiones.

ÁREA DE ACTUACIÓN 2: Desarrollo de métodos, técnicas y sistemas avanzados.

2.1. Diseño y construcción de equipos de medida y procesamiento de señales y datos.

Las tareas básicas de esta actividad estarían orientadas a la identificación de los sistemas de medida disponibles, las variables necesarias para la realización de la actividad y el estudio de las condiciones necesarias para una correcta monitorización:
1. Análisis de requisitos de monitorización y registro. Esta tarea establece como protocolo de operación las siguientes actuaciones: estado de la monitorización actual, variables necesarias, frecuencias de muestreo, datos disponibles en la infraestructura actual, requisitos de acondicionamiento de las señales, integración en el sistema de los equipos de medida y registro, necesidades de comunicación e infraestructuras disponibles, monitorización distribuida y/o centralizada,…
2. Determinación de las necesidades de equipamiento de registro y procesamiento de las señales. La correcta implementación de la infraestructura de registro y procesado de información implicaría el análisis de los siguientes aspectos:
- Estado actual de la tecnología de diagnóstico para sistemas (Sistemas actuales en equipos, soluciones disponibles en el mercado, capacidades de procesamiento necesarias y disponibles).
- Requisitos de cálculo necesarios en base a la definición de los diagnósticos a realizar y requisitos de los nuevos sistemas de diagnóstico a desarrollar.
- Desarrollo de nuevos sistemas en función del tipo de diagnóstico a realizar.

2.2. Sistema avanzado de detección de malfuncionamiento.

La construcción de este sistema partirá del desarrollo de algoritmos para la detección de averías de un sistema a partir del estudio de señales correspondientes a la evolución de distintas variables medidas del mismo. La misión de los algoritmos sería determinar si un equipo o sistema ha pasado de su estado nominal al estado de malfuncionamiento.

Dentro de esta actividad se incluiría la realización de los agentes necesarios para el uso coordinado de las diferentes alternativas de detección de mantenimiento que se desarrollen, además del diseño y desarrollo de los agentes necesarios para la

integración con los otros sistemas que conforma el Sistema Global. Las principales tareas a desarrollar serían:
- *Definición de la estrategia de detección de fallos.* Se estudiarían las arquitecturas de detección de fallos más adecuadas para cada uno de los sistemas /equipos objetivo.
. Diseño de los sistemas de detección de averías.
. Documentación de las variables de interés medibles en cada sistema/equipo y los parámetros de diseño de cada sistema/equipo.
. Evaluar si los modelos obtenidos de simulación del comportamiento de los equipos objeto de estudio, contemplando modelos físico-operativo, pueden ser integrados en alguno de los posibles esquemas de detección de fallos. Esta tarea consistiría en determinar si los modelos obtenidos en las tareas de la Actividad 1.4 pueden ser integrados en alguno de los posibles esquemas de detección de fallos anteriores.
. Si fuera necesario, recomendaciones de cambio en los modelos.
- *Adecuación de modelos y programación de los sistemas.* Se modificarían o harían modelos a medida de los sistemas que lo requieran, y se programarían los métodos adecuados para cada sistema. Los modelos serán de la naturaleza necesaria para la detección de averías: estadísticos, físicos, basados en conocimiento, basados en inteligencia artificial. Estos métodos se programarían en un lenguaje apto para su integración futura.
- *Implantación en un sistema de prueba (Sistema piloto).* Los sistemas de detección de fallos se instalarían en alguno de los sistemas objeto del estudio/proyecto.
- *Realización de ensayos de validación.* Se realizarían ensayos para determinar la validez de los sistemas de detección de averías desarrollados. Los ensayos consistirían en forzar la ocurrencia de las averías de interés con objeto de obtener una información cuantitativa que acredite la decisión.
- *Especificación de ontología de detección de anomalías y modelos de expresiones válidas de detección.*
- *Definición de la ontología a usar en la detección de anomalías y la semántica de las expresiones a usar por el sistema de detección.*
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente tipo para la detección de anomalías basado en modelos de comportamiento normal.* Se analizaría y desarrollaría un agente inteligente tipo capaz de trabajar con los modelos desarrollados y comunicar sus resultados a otros agentes.
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente de cohesión de detección de anomalías.* Se encargaría de la coherencia y completitud de las anomalías detectadas que provengan de los distintos agentes para que no haya conflictos entre ellos o se minimicen.
- *Desarrollo de modelos de detección de malfuncionamiento con incidencia en la eliminación de falsos positivos (o negativos) de acuerdo a objetivos generales de coste de fallo.*
- *Estudio y definición del protocolo de comunicaciones externas del sistema avanzado de detección de malfuncionamiento con los subsistemas restantes y agentes de servicios (Interacción Hombre-Máquina, en adelante IHM, y Repositorio de datos).*
- *Especificación y desarrollo de un agente de coordinación funcional del sistema avanzado de detección de malfuncionamiento.*

- *Programación de los sistemas de detección de malfuncionamiento.* Los sistemas de detección de averías y los respectivos modelos se programarían en un lenguaje apto para su integración futura.
- *Desarrollo de modelos que permitan el establecimiento de límites de operación (estáticos, dinámicos, cambio tasa de fallo, combinación de parámetros,...) a partir del retorno de experiencia (feedback de datos de fallo/operación).*

2.3. Sistema avanzado de diagnóstico de fallos.

Partiendo de las anomalías detectadas en la actividad anterior, el objetivo de esta línea sería el desarrollo de técnicas capaces de diagnosticar la causa raíz u origen de un malfuncionamiento o fallo. A partir de la identificación de la existencia de dicho malfuncionamiento, utilizando una base de datos de posibles fallos del sistema, el sistema de diagnosis debe clasificar la fuente del fallo dentro de una de las posibles, las cuales se habrán caracterizado convenientemente con anterioridad. Las tareas más destacadas a desarrollar serían:
- *Elección de los métodos de diagnostico a aplicar:* métodos de clasificación (reconocimiento de patrones, clasificación de Bayes, geométrica...), métodos de inferencia (árboles de fallos, razonamiento aproximativo, sistemas difusos,...). La elección dependerá del conocimiento que se tenga del funcionamiento de los componentes del estudio.
- *Recepción de anomalías detectadas en la actividad 2.2.* Se debe crear un programa de enlace con la actividad 2.2 para realizar un estudio del fallo. Las tareas asociadas serían:
. Desarrollo de una base de datos con los posibles fallos que se detectan y las variables que han hecho saltar la alarma; la comunicación se realizaría a través de la base de datos. Primero se debería identificar el elemento donde se ha producido el fallo para aplicar la técnica seleccionada en la tarea anterior.
.Protocolo de comunicación con el módulo 2.1. Puente de comunicación con la base de datos de los posibles fallos detectados.
- *Identificación de los problemas a diagnosticar.* Elección de las herramientas de desarrollo:
. Definición clara del problema.
. Determinación de los parámetros del sistema que se van a analizar.
. Selección de las variables de la base de datos que se aplicarán al análisis.
. Determinación, de acuerdo con la naturaleza del problema, de la herramienta de desarrollo del sistema experto.
- *Aplicación de la ingeniería del conocimiento:* transferencia del conocimiento desde la fuente y los expertos en diagnóstico hacia el ingeniero de conocimiento (será el encargado de construir el sistema y de modelar el conocimiento). En esta etapa se deben integrar los trabajos realizados en la actividad 2.1.:
- *Desarrollo de la base de conocimiento y del motor de inferencia.* En esta etapa se traduciría el conocimiento a reglas (selección de las variables), distribuciones de probabilidad u otra forma de representación del conocimiento. Los esquemas de representación deben permitir una búsqueda o una operación eficiente de los mecanismos de inferencia. En ella se definen las posibles soluciones, recomen - daciones, todos los datos que el sistema necesita (identificar y relacionar todos los datos) y la jerarquía y modularización del mismo. Se desarrolla el algoritmo que manejaría los datos y la probabilidad de ocurrencia. Una vez que se tiene el

conocimiento, el motor de inferencia se encarga de sacar conclusiones aplicando el conocimiento a los datos.
- *Construcción de un prototipo:* programa que contiene una pequeña parte del sistema final compuesto por un subconjunto de la base de conocimiento y de un número pequeño de reglas. Los pasos a seguir en la elaboración del prototipo, tras haber adquirido el conocimiento necesario, serían los siguientes: Toma de decisiones de diseño (selección del paradigma de inferencia, selección de la representación del conocimiento, etc.), Implementación, Prueba, Demostración del funcionamiento y revisión del desarrollo del sistema experto.
- *Implementación total e interfaz de usuario.* Después del correcto funcionamiento y depurado del prototipo, se introduciría la totalidad de la base de conocimiento, y se ampliaría el número de reglas hasta desarrollar el sistema experto total. Se desarrollaría un interfaz de usuario que sea de fácil utilización y permita un rápido y sencillo manejo de la información; debe mostrar las conclusiones, las razones que expliquen tales conclusiones y una explicación de las acciones iniciadas por el sistema experto. Cuando el motor de inferencia no llegue a ninguna conclusión por falta de datos, la interfaz será un vehículo para obtener la información necesaria.
- *Comprobación y validación del sistema.* En esta etapa se consultaría a los especialistas o expertos para saber si los resultados son satisfactorios, y también a los usuarios finales, para comprobar la funcionalidad del sistema y asegurarse que cumple con las especificaciones iniciales.
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente tipo para el diagnóstico.* Se analizaría y desarrollaría un agente inteligente tipo capaz de trabajar con los diagnósticos sobre las causas origen de las anomalías detectadas por los modelos de comportamiento normal y comunicar sus resultados a otros agentes tales como de evaluación temporal.
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente de cohesión de diagnósticos.* Se encargaría de la coherencia y completitud de los diagnósticos que provengan de los distintos agentes para que no haya conflictos entre ellos o se minimicen.
- *Estudio y definición del protocolo de comunicaciones externas del sistema avanzado de diagnóstico de fallos con los subsistemas restantes y agentes de servicios (IHM y Repositorio de datos).*
- *Especificación y desarrollo de un agente de coordinación funcional del sistema avanzado de diagnóstico de fallos.*
- *Diseño y desarrollo de un agente inteligente de diagnóstico de fallos.*
- *Desarrollo de un modelo de diagnóstico robusto a la incertidumbre.*
- *Desarrollo de un modelo de diagnóstico basado en redes de decisión, capaces de integrar la información de conocimiento probabilístico con información de decisión y utilidad.*

2.4. Sistema avanzado de evaluación temporal de la degradación y estimación de la vida residual (en adelante ETVR).

El principal objetivo en esta línea consistirá en el desarrollo de modelos para la prognosis de la evolución de fenómenos degradatorios y su incidencia en el comportamiento operacional, fiabilidad y vida remanente de equipos y sistemas en estudio. Estos modelos se fundamentan en el conocimiento del estado operacional o de degradación diagnosticado en tiempo real para el equipo o sistema en base a los métodos propuestos para las actividades 2.2 y 2.3 y en la previsión de condiciones de servicio (operacionales y ambientales) del equipo. Tareas destacables:

- *Selección de algunos elementos representativos del sistema en los que aplicar las técnicas de predicción.*
. Documentación de los sistemas de monitorización y de la fiabilidad de los elementos integrantes de los sistemas.
- *Recogida de datos.* Para poder desarrollar algoritmos de predicción es necesario contar con una base de datos que permita la descripción de los mismos.
. Sistema de recogida de datos con frecuencia de muestro adecuada.
- Diseño de los algoritmos de predicción.
- Programación de los algoritmos de predicción y realización de ensayos para su validación.
. Descripción de la plataforma de integración. Software de programación compatible con ella. Programas desarrollados instalados y recibiendo datos.
- *Análisis del plan de mantenimiento previsto para los modos de fallo analizados.*
- *Análisis del mantenimiento que se prevé realizar para evitar el impacto de los modos de fallo asignados.*
- *Valoración cualitativa de cómo y cuanto influye la desviación del comportamiento normal en la aparición del modo de fallo.*
- *Especificación de un modelo de plan dinámico de mantenimiento según comportamiento de los componentes.* Se investigaría en la formulación de un modelo basado en la acumulación de desviaciones del comportamiento normal, causas del mismo y plan de mantenimiento previsto.
- *Especificación de ontología de diagnóstico y modelos de expresiones válidas de ETVR.* Definición de una ontología a usar en la ETVR y la semántica de las expresiones a usar por el sistema de ETVR.
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente tipo para la ETVR.* Se analizaría y desarrollaría un agente inteligente tipo capaz de trabajar con los modelos desarrollados y comunicar sus resultados a otros agentes.
- *Especificación y desarrollo de un agente inteligente de cohesión de ETVR.* Se encargaría de la coherencia y completitud de las ETVRs que provengan de los distintos agentes para que no haya conflictos entre ellos o se minimicen.
- *Estudio, identificación y desarrollo de modelos de vida remanente a partir de datos de ensayos de vida acelerada (bancos de ensayo y laboratorio).* Identificación de condiciones de operación e información de fiabilidad susceptible de ser integrada en los modelos a desarrollar.
- *Modelo genérico de predicción a partir de datos de fiabilidad, incluyendo interfaces con diferentes herramientas e introduciendo a su vez estimaciones de coste (ciclo de vida, reemplazo, etc.).*
- *Desarrollo de un modelo híbrido de predicción que combine predicción de datos de condición con predicción de datos de fiabilidad.*
- *Estudio y definición de los protocolos de comunicaciones externas del sistema avanzado de ETVR y del sistema avanzado de generación de actividades con los subsistemas restantes y agentes de servicios (IHM y Repositorio de datos).*
- E*specificación y desarrollo de un agente de coordinación funcional del sistema avanzado de ETVR, y un agente de coordinación funcional para el sistema avanzado de generación de actividades de mantenimiento.*
- *Estudio y definición de los requisitos del sistema de soporte a la toma de decisiones y la interacción con los sistemas de planificación.* Definición de elementos de razonamiento, cuantificables y no cuantificables, para la toma de decisiones.

- *Diseño y desarrollo de una herramienta para la gestión de los planes de mantenimiento del sistema de soporte a la toma de decisiones, que cohesione la respuesta de los diferentes sistemas de planificación.*
- *Estudio y desarrollo de modelos de optimización global multiobjetivos para el sistema avanzado de planificación de mantenimiento.*
- *Estudio y desarrollo de modelos de optimización global multiobjetivo con incertidumbre para el sistema avanzado de planificación de mantenimiento.*
- *Estudio y desarrollo de modelos de Ayuda y Soporte a la toma de decisiones para el sistema avanzado de planificación del mantenimiento.*

. Sistema de soporte a la toma de decisiones a partir de las necesidades de producción o demandas previstas y de los informes de diagnóstico y previsión proporcionados por las actividades de Diagnosis /Prognosis. La aplicación de toma de decisiones ha de proporcionar información útil y procedimientos para decidir el momento óptimo para realizar las operaciones de mantenimiento o reparación, de manera que se minimicen o eliminen las interferencias que el mantenimiento pudiera tener sobre la operación de los sistemas. Para ello se emplearían diversos métodos, entre los que cabe destacar, el uso de puntos singulares (Ideal, Anti-Ideal y Funcionamiento), Ordenación de preferencias por similaridad (TOPSIS), métodos cuantificables y métodos no cuantificables, pertenecientes a las conocidas como Escuela Americana y Escuela Francesa respectivamente en lo que a toma de decisiones se refiere. Se considerarán dos niveles de decisión denominados "Ayuda" y "Toma" respectiva - mente. El primero, destinado fundamentalmente a reducir el número de soluciones posibles hasta un número lo bastante bajo como para que pueda aplicarse con garantías el segundo. Los resultados de este sistema, aunque podrán ser manejados de forma autónoma, también podrán ser manejados por la Interfase de Soporte a Decisiones que se desarrolla en otra actividad.

- *Desarrollo de modelos de estimación de vida remanente que integren condiciones de operación e información de fiabilidad.*
- *Validación de los modelos de evaluación de estimación de vida remanente desarro llados.*
- *Desarrollo del modelo de estimación de la condición del equipo.* Esta etapa persigue identificar la variable física o estocástica que caracteriza al fenómeno degradatorio y establecer un modelo de correlación (mecanicista, empírico o estadístico/probabilista) entre los parámetros físicos monitorizados y diagnosticados y el estado de degradación del componente.
- *Identificación de "estados de degradación singulares".* En la actualidad el mante - nimiento preventivo por condición se ejecuta en función de que se alcancen estados de degradación preestablecidos (por ejemplo, fugas en sistemas de refrigeración), por lo que resulta preciso identificar a priori aquellos estados (uno o dos niveles a lo sumo) del componente que puedan suponer una ruptura súbita (preventivo, sustituciones parciales, etc.) en la evolución del fenómeno como consecuencia de una actividad planificada.
- *Desarrollo del modelo de evolución del estado de degradación del equipo.* Desarrollo del modelo de evolución del estado de degradación/condición del equipo en función de las condiciones de servicio y mantenimiento con la consideración de estados singulares.

Modelo de prognosis de evolución de la condición del equipo.

- *Desarrollo del modelo de fiabilidad del equipo.* Integración del modelo de evolución de la degradación para desarrollar un modelo de fiabilidad del equipo frente al modo de fallo relevante para el fenómeno de degradación. El desarrollo de dicho modelo integraría además la utilización de modelos de vida acelerada (condiciones de servicio variables) y de mantenimiento imperfecto.
- *Desarrollo del modelo de estimación de vida remanente.* En esta etapa se contem - plan dos enfoques según su viabilidad. El primero, corresponde a la estimación directa de la vida residual mediante un modelo físico coherente con el modelo físico de estimación de la condición de degradación del equipo. El segundo, consiste en utilizar un método probabilista basado en la utilización de un modelo de fiabilidad del equipo frente al modo de fallo.
- *Desarrollo del modelo de disponibilidad del equipo.* Integración del modelo de fiabilidad para desarrollar un modelo de disponibilidad del equipo en relación al fenómeno de degradación.
- *Desarrollo del modelo de riesgo asociado a la operación del equipo en relación al fenómeno de degradación.* Este modelo se desarrollaría a partir del modelo de fiabilidad de equipo y de cuantificación del daño asociado al fallo, por ejemplo en términos de disponibilidad, costes en el ciclo de vida, seguridad, medioambiente.
- *Formulación y propagación del efecto de las incertidumbres en los modelos desarrollados.* La incertidumbre es inherente al proceso de estimación del estado de degradación del equipo como consecuencia de la incertidumbre en los procesos de monitorización de parámetros significativos como en los modelos para su diagnosis y prognosis. Esta incertidumbre se agrega a la propia de los modelos de estimación de fiabilidad, vida residual y riesgo, y afecta a la posterior toma de decisiones a realizar dentro de las aplicaciones previstas (actividad 3.1). Es por ello, que esta última etapa se dirigiría a desarrollar un procedimiento que permita formular y propagar el efecto de las incertidumbres en los modelos anteriores. Aunque existen diferentes aproxi - maciones, el estudio se centraría en la utilización de modelos probabilistas.
- *Desarrollar un submódulo, a integrar dentro del sistema de toma de decisiones, que identifique el coste de ciclo de vida de las decisiones de mantenimiento mediante la identificación de los aspectos de inventario más relevante y su evaluación en tres vertientes: económica, medioambiental y de seguridad.*
- *Modelos de estimación coste/rendimiento del mantenimiento.*
. Estudio y elaboración de modelos de comportamiento económico necesarios para los procesos de toma de decisiones:
.Modelo de impacto sobre plan de negocio.
. Modelo de rentabilidad en explotación.
.Modelo de impacto sobre activos financieros.
. Modelo de rentabilidad en explotación.

ÁREA DE ACTUACIÓN 3: Integración de tecnologías y métodos. Aplicaciones.

3.1. Desarrollo de aplicaciones.

El objetivo de esta actividad sería el desarrollo de aplicaciones para la toma de decisiones de operación y mantenimiento, el retorno de la experiencia operativa y el desarrollo de procedimientos y especificaciones técnicas.

A partir de las necesidades de producción y de los informes de diagnóstico proporcionados por el sistema del Área de actuación 2, la aplicación de toma de decisiones ha de proporcionar información útil para decidir el momento óptimo para

la realización de las operaciones de mantenimiento o reparación, de manera que se minimicen o eliminen las interferencias que el mantenimiento pudiera tener sobre las tareas relacionadas con la operación. Las aplicaciones básicas a desarrollar serían:
- *Interfases gráficas de usuario (en adelante IGU) que suministren información del estado y los resultados del sistema de detección de anomalías y diagnosis por equipo.*
- *Estudio y definición de métodos de representación visual y mecanismos de interacción adecuados a la supervisión y control de sistemas multiagentes.*
- *Diseño y desarrollo de IGUs para la supervisión, gestión y control del sistema multiagente.*
- *Búsqueda de herramientas que permitan la recopilación, tratamiento, análisis de la información y generación de informes de supervisión, rendimiento y resultados del sistema.*
- *Estudio y definición de la información no relacionada con el dominio físico (criterios de explotación, plan de negocio e información logística) necesaria para el sistema.*
- *Diseño e implementación de herramientas que permitan la incorporación al sistema de la información no relacionada con el dominio físico.*
- *Extracción de reglas.* En función de la metodología de gestión de los medios de producción y mantenimiento y de los requerimientos del sistema, se desarrollarán reglas de producción.
- *Programación del sistema inteligente basado en conocimiento, su interfaz de usuario y su interfaz con otras aplicaciones de gestión.*
- *Validación del sistema desarrollado a través de ensayos.*

3.2. Integración de herramientas.

El objetivo principal de esta actividad sería conseguir que el conjunto de sistemas desarrollados funcionen como una unidad y sea manejable por el usuario. Como producto, obtener una herramienta desde la cual tener acceso a todos los sistemas desarrollados en el proyecto, creando un entorno de trabajo que permita un manejo y aprendizaje intuitivo del mismo y que utilice información gráfica de forma adecuada. El IHM debe estar diseñado de forma que permita incluir nuevas funcionalidades a medida que se añadan nuevas tecnologías, se actualicen las existentes o se incorporen nuevas aplicaciones. Las principales tareas a desarrollar serían:
- *Análisis y diseño de una plataforma multiagente abierta y distribuida para la convivencia e intercambio de información entre los agentes. I*dentificación de las de estructuras de datos que soporte los procesos a realizar en las distintas actividades. Ingeniería del software y metodologías de desarrollo.
- *Análisis de integración de agentes en un entorno multiagente.* Se analizarían los requisitos de integración de información de los agentes en una plataforma multi - agente abierta y distribuida.
- *Desarrollo de la plataforma multiagente para la convivencia e intercambio de información entre los agentes según comportamiento.*
- *Desarrollo e integración de agentes coordinadores en la plataforma multiagente así como de los encargados de los servicios esenciales de la misma.*
- *Estudio, diseño y desarrollo de interfases gráficas de usuario que suministren información del estado y los resultados del sistema de detección de anomalías y diagnosis por equipo.*

- *Estudio y definición de métodos de representación visual y mecanismos de interacción adecuados a la supervisión y control de sistemas multiagentes.*
- *Estudio para la realización de una guía de diseño visual y diseño de la interacción de interfases gráficas de usuario, que garantice la unificación de las distintas interfases desarrolladas para el sistema y facilite su aprendizaje.*
- *Diseño y desarrollo de la Interfase Hombre Máquina (IHM) del sistema así como de las interfases gráficas de usuario para la supervisión, gestión y control del sistema multiagente.*
- *Herramientas que permitan la recopilación, tratamiento, análisis de la información y generación de informes de supervisión, rendimiento y resultados del sistema.*
- *Desarrollo de la interfase con el sistema de soporte a la toma de decisiones.* Esta interfase incluiría las siguientes características principales: Soporte gráfico a las diferentes alternativas sobre las que se tomará una decisión, Simuladores de resultados en función de cada solución que el tomador de decisiones considere, comparador de resultados de las simulaciones, Asesor inteligente en línea, rastreador continuo de la base de datos del sistema para mostrar las situaciones anteriores más parecidas a la actual y las soluciones que se adoptaron y capacidad de interacción con la Interfase Hombre Máquina del sistema.

3.3. Adaptación de los sistemas.

En esta etapa se deben definir los problemas potenciales que puedan afectar al desarrollo y a la comunicación:

- *Documento con los requisitos del sistema, listado de los datos E/S, documento con los problemas potenciale.*
- *Proceso de elaboración.* Diseño. Se creará el modelo de la arquitectura, es decir una especificación tecnológica y una representación de los distintos módulos de la aplicación. La especificación tecnológica comprende todos los elementos hardware y software que tiene importancia en el desarrollo de la aplicación. También se detallará el modelo de datos: la estructura con la que la aplicación almacena los datos y el modo en el que se intercambian datos con otros sistemas. Por último, se redactará un plan de pruebas del sistema. .

3.4. Desarrollo de proyectos piloto.

Se debe tener en cuenta a los usuarios finales de la aplicación y la gerencia del cambio; se definirán las actividades necesarias para una adaptación del personal al nuevo sistema: cursos formativos para el manejo de la aplicación, manuales,...

ANEXO VI

PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS.

PUBLICACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS.

En este anexo se recoge el listado de los artículos y conferencias nacionales e internacionales desarrolladas en relación con la presente tesis. La primera página de cada contribución será adjuntada al final de la tesis.

1. CONGRESOS NACIONALES E INTERNACIONALES.

- ***Título:*** Sistema avanzado para la planificación del mantenimiento con un enfoque estratégico e integrador de aplicación a entornos industriales.
  Autores: A.L. Álamo, B. Galván, M. Méndez, G. Winter.
  Congreso: XIII Congreso de Confiabilidad. Zaragoza, España. Noviembre, 2011.

- ***Título:*** Proposition d'Aide au Choix avec des AEMO.
  Autores: M. Méndez, A.L. Álamo, M. Frutos, D. Greiner, B. Galván, G. Winter.
  Congreso: ROADEF 2013 (Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision). Troyes, France. Febrary, 2011.

- ***Título:*** Problemática *gamma* de Ordenación con Algoritmos Evolutivos Multi -Objetivo y Programación Compromiso.
  Autores: M. Méndez, B. Galván, M. Frutos, A.L. Álamo.
  Congreso: IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bio – inspirados (MAEB2013). Madrid, España. Septiembre, 2013.

2. REVISTAS CIENTÍFICAS INTERNACIONALES *(en revisión).*

- Reliability Engineering & System Safety (Elsevier Editorial).
  Título: Influence of the performance guarantees on the best alternative selection process in the acquisition phase in DBM contracts.
  Autores: A.L. Álamo, M. Méndez, B. Galván.

- Engineering Optimization (Taylor & Francis).
  Título: A compromise solution with multi-objective evolutionary algorithms under partial user preferences.
  Autores: M. Méndez, A.L. Álamo, B. Galván, D. Greiner.

1. CONGRESOS NACIONALES E INTERNACIONALES.

1.1. XIII Congreso de Confiabilidad. Zaragoza, España. Noviembre, 2011.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD
AEC

50 años
Aportando valor

La Secretaría del XIII **Congreso de Confiabilidad,** la Asociación Española para la Calidad (AEC), sita en Madrid, calle Claudio Coello, 92.

CERTIFICA:

Que Antonio Luis Álamo
ha participado como ponente al **XIII Congreso de Confiabilidad**, celebrado el día **23-25** de noviembre de **2011** en Zaragoza.

Zaragoza , 25 de noviembre de 2011.

C.I.F. G 28210029

Claudio Coello, 92 • 28006 Madrid • Tfno.: 915 752 750 • Fax: 915 765 258 • aec@aec.es • www.aec.es

SISTEMA AVANZADO PARA LA PLANIFICACIÓN DEL MANTENIMIENTO CON UN ENFOQUE ESTRATÉGICO E INTEGRADOR DE APLICACIÓN A ENTORNOS INDUSTRIALES.

A.L. Álamo
Dpto de Matemáticas (ULPGC)

B. Galván
Inst. Univ. de Sistemas Inteligentes(IUSIANI)

M. Méndez
Dpto de Informática y Sistemas (ULPGC)

G. Winter
Inst. Univ. de Sistemas Inteligentes(IUSIANI)

1.- RESUMEN.

Varios autores insisten en que el mantenimiento es una actividad clave en la industria. En este contexto, la toma de decisiones en el ámbito del mantenimiento es extremadamente importante debido a su impacto sobre los resultados económicos de la empresa en un entorno de alta competitividad como el actual. Sin embargo, el grado de aplicación de dichas iniciativas en plantas industriales resulta relativamente limitado. Aunque el impacto del mantenimiento sobre los resultados financieros de la empresa puede ser relevante, la gestión del mantenimiento ha sido descuidada durante mucho tiempo, tanto a nivel práctico como de investigación. Dekker (1996) afirmaba, por la baja cantidad de casos reales de aplicación desarrollados en el ámbito del mantenimiento, que era la última frontera de la gestión científica.

La construcción de un modelo cuantitativo que se adapte a las necesidades y especificidades de la organización exigirá, no sólo un conocimiento riguroso de las técnicas OR/MS, sino también entender las principales claves de funcionamiento de una organización, sus interconexiones y relaciones (tanto a nivel externo como interno) y las prácticas de mantenimiento requeridas.

Las tendencias actuales en fabricación han conducido a una reducción de los niveles de inventarios de reserva (buffer) y a un aumento de los niveles de automatización y complejidad de los equipos. Estas tendencias han hecho que la adopción de políticas de mantenimiento efectiva sean más importante que nunca.

Se propone una *Estructura de Control Dinámica* que permita la coevolución de los índices de performance del sistema con los cambios asociados a factores tanto internos como externos (Definición del fenotipo del sistema). El objetivo es el diseño de un modelo de referencia de apoyo a la toma de decisiones que posibilite la adaptación del sistema a los cambios mediante equilibrio dinámico. Entre las ventajas del modelo cabe destacar:

- Su aplicación en la planificación, con un enfoque estratégico e integral, de la explotación y mantenimiento de equipos.
- Dar soporte a la toma de decisiones y, en su caso, optimizar la explotación de equipos bajo criterios de fiabilidad, disponibilidad, seguridad pública y medioambiental, costes en el ciclo de vida y criterios de explotación y plan de negocio de la empresa.
- Reducir los niveles de incertidumbre.
- Realimentar los resultados de la experiencia de explotación de la plataforma modular, con objeto de mejorar el diseño de los diferentes equipos y sistema, en colaboración con el/los fabricante/s.
- Aumentar la confiabilidad del sistema y reducir los riesgos asociados a la operación.

1.2. ROADEF 2013 (Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision). Troyes, France. Febrary, 2011.

Je, soussignée, Alice Yalaoui, co-présidente du comité d'organisation, atteste que

a exposé le travail intitulé:

Proposition d'Aide au Choix avec des Algorithmes Évolutionnaires Multi-Objectif

lors du 14ème congrès de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision ROADEF 2013, les 13,14 et 15 février 2013 à l'Université de Technologie de Troyes.

UNIVERSITE de TECHNOLOGIE TROYES

Alice YALAOUI

Proposition d'Aide au Choix avec des Algorithmes Évolutionnaires Multi-Objectif*

M. Méndez[1], A.L. Álamo[2], M. Frutos[3], D.Greiner[1], B. Galván[1]

[1] Institut Universitaire de Systèmes Intelligents (SIANI), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Las Palmas de Gran Canaria, 35017, Espagne
mmendez@dis.ulpgc.es, dgreiner@iusiani.ulpgc.es, bgalvan@step.es

[2] Département de Mathématiques, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Las Palmas de Gran Canaria, 35017, Espagne
aalamo@dma.ulpgc.es

[3] Département d'Ingénierie, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahia Blanca, Argentine
mfrutos@uns.edu.ar

Mots-clés : *Algorithme evolutionnaire multi-objectif, aide au choix, préférences.*

1 Introduction

Lorsque l'on traite des problèmes d'optimisation réels de complexité NP-difficile et des objectifs à satisfaire contradictoires, les Algorithmes Évolutionnaires Multi-Objectif (AEMO) ont prouvé obtenir d'excellents résultats. Une classification récente des AEMO proposée par Branke [1], comprend une approche -AEMO sous préférences partielles- intermédiaire entre les approches a priori et a posteriori. Branke considère qu'un décideur peut avoir une connaissance imprécise sur les solutions qui peuvent être préférées et l'intégrer dans un AEMO, afin d'obtenir un petit ensemble de solutions (Frontière Partielle de Pareto FPP), lequel contiendra les solutions préférées de plus grande probabilité pour le décideur. Plus tard, le décideur choisit une solution en fonction de ses préférences. De nombreuses méthodes d'aide à la décision qui permettent à un décideur de choisir ou ranger entre les solutions de la Frontière de Pareto (FP) sont présentées dans la littérature. Néanmoins, dans ce travail nous nous intéressons à des ensembles partiels FPP de solutions Pareto optimales. Dans cette idée, nous proposons d'utiliser la métrique 1 de Minkowsky dans le modèle du "Compromise Programming" [3], pour fournir une solution de choix attractive au décideur.

2 Méthode

Supposons un problème multi-objectif réel (à minimiser). Tout d'abord, un décideur exprime ses préférences par exemple avec un point de référence g dans l'espace des objectifs, et g-NSGAII [2] (une autre métaheuristique peut être utilisé) obtient la FPP discrète (puisque les AEMO sont basés sur la notion de population des solutions) montrée dans la Fig. 1 (a). Puis, on calcule le vecteur idéal ($I^+_{FPP} = x^+_1, x^+_2, ..., x^+_j, ..., x^+_n$), voir Fig. 1(b). Finalement, on résout le problème de minimisation (1) pour obtenir la solution la plus proche au vecteur idéal I^+_{FPP}.

$$Min_i \; L_1^{I^+_{FPP}}(A_i) = \sum_{j=1}^{n} w_j \left| x_{ij} - x^+_j \right| \tag{1}$$

*Ce travail est supporté par le Departamento de Informática y Sistemas de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

1.3. IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bio inspirados (MAEB2013). Madrid, España. Septiembre, 2013.

MAEB 2013

CEDI-MADRID
17-20 Septiembre

IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados
MAEB 2013

El comité organizador del IX Congreso Español de Metaheurísticas, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados (MAEB 2013), celebrado los días del 17 al 20 de septiembre del 2013 en Madrid, certifica que:

ha presentado la ponencia titulada:

Problemática gamma de Ordenación con Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo y Programación Compromiso

Y para que así conste, se expide el presente certificado en Madrid, a 16 de septiembre del 2013.

Fdo. Dr. José Ignacio Hidalgo,
Co-Presidente del MAEB 2013

Fdo. Dr. Abraham Duarte,
Co Presidente del MAEB 2013

FACULTAD DE INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA
DE COMPUTADORES Y AUTOMÁTICA

Problemática γ de Ordenación con Algoritmos Evolutivos Multi-Objetivo y Programación Compromiso

M. Méndez[1], B. Galván[1], M. Frutos[2], A.L. Álamo[3]

[1] Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería (SIANI), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), España
mmendez@dis.ulpgc.es, bgalvan@step.es

[2] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina
mfrutos@uns.edu.ar

[3] Departamento de Matemáticas, Edificio Informática y Matemáticas, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), España
aalamo@dma.ulpgc.es

Abstract. La comunidad multi-objetivo ha mostrado recientemente un interés significativo por los algoritmos evolutivos multi-objetivo que introducen preferencias parciales del decisor. La intención, es dirigir la búsqueda de soluciones hacia la zona de predilección -Frente-óptimo Parcial Preferido de Pareto- para luego, elegir u ordenar el conjunto de soluciones encontrado en consonancia con las preferencias del decisor. Sin embargo este último aspecto no es trivial, pues aunque son numerosos los métodos existentes de Análisis de las Decisiones Multi-criterio, todos suponen Frentes-óptimos de Pareto completos. En este trabajo proponemos una idea sencilla de ayuda a un decisor para la ordenación (problemática γ) de manera automatizada del conjunto parcial preferido de soluciones encontrado, utilizando algoritmos evolutivos multi-objetivo que integran preferencias parciales y Programación Compromiso.

Keywords: Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo, Programación Compromiso, Preferencias Parciales, Ayuda a la Decisión.

1 Introducción

Numerosos problemas de optimización de la vida real son de naturaleza difícil y multi-objetivos. En este contexto, los Algoritmos Evolutivos Multi-objetivo (AEMOs) son una herramienta muy popular en la comunidad multi-objetivo que ha demostrado [3] obtener excelentes resultados. Cuando se utilizan AEMOs, una consideración importante es en qué momento el decisor colabora con el algoritmo [8]. A posteriori, el decisor expresa sus preferencias al final, cuando el Frente-óptimo de Pareto (FOP) amplio y bien distribuido ha sido completamente determinado; la mayoría de los AEMOs son clasificados como a posteriori. Ejemplos clásicos que usan este enfoque son NSGAII [5] y SPEAII [18]. Los métodos

2. REVISTAS CIENTÍFICAS INTERNACIONALES *(en revisión)*

2.1. Reliability Engineering & System Safety (Factor Impacto, 2012: 1.901).

Elsevier Editorial System(tm) for Reliability Engineering & System Safety
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: INFLUENCE OF THE PERFORMANCE GUARANTEES ON THE BEST ALTERNATIVE SELECTION PROCESS IN THE ACQUISITION PHASE IN DBM CONTRACTS

Article Type: Research Paper

Keywords: RAMS(Reliability, Availability, Maintainability, Safety or Supportability); System Engineering; Life Cycle Cost Analysis (LCCA); Performance Guarantees; Multiple criteria decision - making (MCDM); Multiple Objective optimization; CAPEX (capital expenditure); OPEX (operation expenditure).

Corresponding Author: Mr. Antonio Luis Álamo, M.D

Corresponding Author's Institution: University of Las Palmas de Gran Canaria

First Author: Antonio Luis Álamo, M.D

Order of Authors: Antonio Luis Álamo, M.D; Máximo Méndez, Ph.D.; Blas Galván, Ph.D.

INFLUENCE OF THE PERFORMANCE GUARANTEES ON THE BEST ALTERNATIVE SELECTION PROCESS IN THE ACQUISITION PHASE IN DBM CONTRACTS .

A.L. Álamo [a,*], M. Méndez [b,1], B. Galván [b,2]

[a] Mathematics Department, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain
[b] University Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering (SIANI), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain

Abstract.
In this work the influence of the performance guarantees on the best alternative selection process for DBM (Design & Built & Maintain) contracts are analyzed by means of a novel decision process developed to design Technical and Operation & Maintenance Cost-effective solutions (STM+C) of complex technological systems.
Performance guarantees are the minimal levels of functional performance requirements demanded from the selected solution. Its translation in economic terms will be made through the so called compensation formulas (quantification of the deferred costs/benefits of a STM). Its analysis is very important in the tender and award phases to create a financial incentive for the contractors for the enhancement of the level of some or all the RAMS factors(reliability, availability, maintainability, safety) and the reduction of the deferred effects(economic, accidents,…) associated to mistakes in the design or decision-making in the acquisition phase. They are used to minimize the impacts of a solution on the client and to transfer the deferred costs/benefits of a STM to the contractor. It gives value to a model that emphasizes a risk-based decision process through the deferred economic effects.
The decision process is focused to the system life cycle in the design phase in base the interest and objectives of the client (trade-off requirements); it is structured on a multi-stage decision making methodology based in the latest scientific advances and considers trade –off requirements to find the best solution, which goes beyond what is stated with mandatory requirements. LCC and RAMS are the methods to be used to provide data on which a trade-off between the value of capital asset (CAPEX) and its performance and cost can be made (OPEX)for finding the best solution.
The model describes five different phases of the design stage for the Acquisition Phase namely Benchmarking, Conceptual design phase (tender phase), Preliminary design phase (Advanced development), Definitive design phase (Detail design & Development) and Execution phase (STM+C verification).
In the Definitive design phase is where are defined the performance guarantees and the equations of compensation with the information of the effects of the failure modes and its consequences for an alternative and a good understanding of the cost of risk vs. resources cost relation, for each alternative.
There are basically two types of process inputs that can influence trade-off decisions: mandatory and trade-off requirements. Mandatory specifies the necessary and sufficient conditions that a minimal system must have in order to be acceptable for the client. Trade-off requirements should state conditions that make the client/customer more satisfied.

Corresponding author. Tel.: +34 928 458835; fax: +34 928 458811
Email addresses: aalamo@dma.ulpgc.es (A.L. Álamo); maximo@dis.ulpgc.es (M.Méndez); blgalvan@gmail.com (B. Galván)
[1] Tel.: +34 928 458702; fax: +34 928 458717
[2] Tel.: +34 928 454599; fax: +34 928 458717

2.2. Engineering Optimization (Factor Impacto, 2012: 0.962).

Engineering Optimization

A compromise solution with multi-objective evolutionary algorithms under partial user preferences

Journal:	*Engineering Optimization*
Manuscript ID:	Draft
Manuscript Type:	Original Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Méndez, Máximo; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering (SIANI), Álamo, Antonio Luis; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Mathematics Department Galván, Blas; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering (SIANI), Greiner, David; Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering (SIANI),
Keywords:	Multiple criteria decision analysis, multi-objective evolutionary algorithms, multi-objective optimization, g-dominance, compromise solution

For Review Only

SCHOLARONE™
Manuscripts

URL: http:/mc.manuscriptcentral.com/geno Email: A.B.Templeman@liverpool.ac.uk

To appear in *Engineering Optimization*
Vol. 00, No. 00, Month 20XX, 1–19

A compromise solution with multi-objective evolutionary algorithms under partial user preferences

M. Méndez[a*], A.L. Álamo[b], B. Galván[a] and D. Greiner[a]

[a] *Institute of Intelligent Systems and Numerical Applications in Engineering (SIANI), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain;* [b] *Mathematics Department, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Spain*

(*Received 00 Month 20XX; final version received 00 Month 20XX*)

A common technique used to solve Multi-objective Optimization Problems (MOP) consists of first generating a non-dominated set of solutions and then choosing the most interesting solution for a human decision maker (Generate First-Choose Later technique). Here, a two-stage search is proposed: First, using a Multi-objective Evolutionary Algorithm under partial user preferences (mixed a priori/posteriori MOEA) to obtain a Preferred Partial Pareto-optimal Front (PPPOF) of non-dominated solutions and, second, using the Manhattan L_1 distance metric in the Compromise Programming (CP) model, devoted to selecting a solution. The concept of compromise solution (CS) and its determination are adapted in this study for situations in which PPPOF of solutions are used. The novelty here lies in the fact that it is not necessary to know the ideal solution of the MOP in the CP model in order to calculate the CS. Three application cases are included to validate the proposed procedure.

Keywords: Multiple criteria decision analysis; multi-objective evolutionary algorithms; multi-objective optimization; g-dominance, compromise solution

1. Introduction

When real multicriteria or multiobjective optimization problems (MOP) are tackled, two different working approaches can be identified in the literature. The first, known as Multiple Criteria Decision Analysis, is essentially interested in decision making, for example in helping a human decision maker (DM) to choose between various alternatives or solutions in accordance with several conflicting criteria or objectives. The main representatives of this approach can be found in schools of economics, management and finance and the role and participation of the DM before and during the decision-making process are decisive. The second, Multi-objective Optimization (MOO), more to the taste of engineers and mathematicians, is related to highly complex optimization problems, where, rather than the decision, the major interest lies in using fast algorithms to find a non-dominated set of solutions or Pareto-optimal Front (POF). In this approach, DM participation in the search process may not be necessary. Multiple Criteria Decision Analysis and Multi-objective Optimization are therefore two disciplines belonging to two different scientific communities, who solve similar problems and communicate with one another but have different competences.

Multiple Criteria Decision Analysis methods are categorized in accordance with two perspectives. The first, known as Multiple Criteria Decision Making (MCDM), includes

*Corresponding author. Email: mmendez@dis.ulpgc.es

URL: http:/mc.manuscriptcentral.com/geno Email: A.B.Templeman@liverpool.ac.uk