



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
Departamento de Ingeniería Mecánica

D. JOSÉ MANUEL QUINTANA SANTANA, SECRETARIO DEL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS
PALMAS DE GRAN CANARIA,

CERTIFICA,

Que el Consejo de Doctores del Departamento, en su sesión de fecha de 21 de Septiembre de dos mil doce, tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación a la tesis doctoral titulada “**Análisis y simulación de la tecnología de ósmosis inversa con fuentes energéticas no convencionales**”, presentada por el doctorando D. FRANCISCO JAVIER GARCÍA LATORRE y dirigida por los Doctores D. ANTONIO GÓMEZ GOTOR y D. JOSÉ ANTONIO CARTA GONZÁLEZ.

Y para que así conste, ya efectos de lo previsto en el Artº 73.2 del reglamento de Estudios de Doctorado de esta Universidad, firmo la presente en Las Palmas de Gran Canaria, a 21 de Septiembre de dos mil doce.

Fdo.: José Manuel Santana Quintana

UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
Programa de Doctorado Tecnología Industrial
(Bienio 1991-1993)



TESIS DOCTORAL

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE
ÓSMOSIS INVERSA CON FUENTES ENERGÉTICAS
NO CONVENCIONALES**

Memoria presentada, en cumplimiento de los requisitos
para optar al grado de DOCTOR, por el Ingeniero
Industrial D. Francisco Javier García Latorre

Directores: Dr. D. Antonio Gómez Gotor
Dr. D. José Antonio Carta González

Los Directores

El Doctorando

Las Palmas de Gran Canaria, OCTUBRE de 2012.

La presente tesis doctoral se ha validado mediante el proyecto OPRODES (Optimization of RO Desalination Systems Powered by Renewable Energies, Contract JOR3-CT98-0274,) proyecto cofinanciado por la comisión Europea en el marco de trabajo del programa de energía no nuclear JOULE III.

El presente trabajo se lo dedico a Maribel ya que gracias a su empeño consiguió que fuera terminado.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que han contribuido a la realización de esta tesis, en especial a los directores, José Antonio Carta González y Antonio Gómez Gotor, ya que pusieron todo su afán en que los trabajos llegaran a buen fin.

Quiero agradecer también a todos aquellos compañeros y compañeras que no cesaron en el empeño de animarme a conseguir culminar el presente trabajo, especialmente a Ignacio De la Nuez Pestana, cuya colaboración ha sido muy importante en la elaboración de la presente Tesis.

Índice General.

1. Introducción General	I
1.1. El binomio energías renovables – desalinización	01
1.2. Objetivos de la tesis	10
1.3. Metodología de la tesis	11
1.4. Estructura de la tesis	12
2. Energías renovables y desalación.	II
2.1. Integración de las energías renovables en el proceso de desalinización	01
2.2. Estado del arte	04
2.2.1. Tecnología Eólica.....	04
2.2.1.1. Introducción	04
2.2.1.2. Estado del desarrollo mundial	05
2.2.1.3. Tecnologías Disponibles	11
2.2.1.4. Descripción general de un sistema de conversión de energía eólica.	13
2.2.1.5. Sistemas de conversión de energía.	14
2.2.1.6. Presencia de las diferentes tecnologías en España	16
2.2.1.7. Sistema conectado a red	17
2.2.1.8. Sistemas aislados	18
2.2.1.9. Costes	18
2.2.2. Tecnología Solar Fotovoltaica	18
2.2.2.1. Introducción	18
2.2.2.2. Estado del desarrollo de la energía solar fotovoltaica en Europa.	20
2.2.2.3. Estado del desarrollo de la energía solar fotovoltaica en España.	22
2.2.2.4. Islas Canarias	24
2.2.2.5. Caracterización de la energía solar.	25
2.2.2.6. Estructura básica de una célula solar. Módulo fotovoltaico.	26
2.2.2.7. Tecnologías Disponibles	27
2.2.2.8. Descripción general de un sistema fotovoltaico. Aplicaciones.	30
2.2.2.9. Sistema conectado a red	32
2.2.2.10. Sistemas aislados	33
2.2.2.11. Costes	33
2.2.3. Tecnología de desalinización.	34
2.2.3.1. Introducción a los sistemas de desalinización.	34
2.2.3.2. Desarrollo Histórico de la Desalación	35
2.2.3.3. Historia de la Desalación en Canarias	37
2.2.3.4. Técnicas de desalación	39
2.2.3.5. Procesos de desalinización	39
2.2.3.6. Procesos con membranas	43
2.2.3.7. Procesos químicos	44
2.2.3.8. Aspectos Económicos	44

3. Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica de Origen Eólico	III
3.1. Introducción	01
3.1.1. Variación de la velocidad del viento con la altura y rugosidad del terreno.	04
3.2. Análisis de los regímenes de viento.	06
3.2.1. Análisis estadístico de los datos de viento.	06
3.2.1.1. Velocidades Medias Horarias.	07
3.2.1.2. Velocidades Medias Diarias.	07
3.2.1.3. Velocidades Medias Mensuales.	08
3.2.1.4. Histogramas de Frecuencias.	08
3.2.2. Representación matemática de los regímenes de viento.	09
3.2.2.1. La distribución de Weibull.	09
3.2.2.2. Momentos de la Distribución de Weibull.	11
3.2.2.3. Estimación de los parámetros de Weibull.	14
3.2.2.3.1. El Método de los Momentos.	14
3.2.2.3.2. El Método de los Mínimos cuadrados.	16
3.2.2.3.3. El Método de la Máxima Verosimilitud.	17
3.2.2.3.4. El Método del Factor de irregularidad.	18
3.2.2.3.5. Comparativa entre los diferentes métodos.	19
3.2.2.3. Estudio de Calmas y Rachas.	21
3.2.2.4. Estudio de Direcciones.	22
3.2.2.5. Análisis de Turbulencias.	23
3.3. Simulación de los Regímenes de Viento.	24
3.3.1. Estimación de velocidades medias periódicas. Método de los ratios.	26
3.4. Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica.	27
3.4.1. Determinación de la energía producida por un aerogenerador.	27
3.4.1.1. Método estático.	27
3.4.1.2. Método cuasi dinámico.	29
3.4.1.3. Método dinámico.	29
4. Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica de Origen Fotovoltaico	IV
4.1. Introducción.	01
4.2. Modelado del clima.	02
4.2.1. Introducción.	02
4.2.1.1. Modelado de la radiación solar.	02
4.2.1.2. Descomposición de la radiación global horizontal en sus componentes.	04
4.2.1.2.1. Irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal.	04
4.2.1.2.1.1. Valor de la constante B_0	04
4.2.1.2.1.2. Factor de corrección de la excentricidad de la eclíptica ϵ_0 y declinación solar δ	04
4.2.1.2.1.3. Cálculo de la distancia cenital (θ_{ZS}).	05
4.2.1.2.1.4. Cálculo de la componente difusa de la radiación sobre superficie horizontal $D_h(0)$	06
4.2.1.2.1.5. Cálculo de la componente directa de la radiación sobre superficie horizontal $B_h(0)$	07
4.2.1.2.2. Cálculo de las componentes de radiación global para superficies inclinadas.	07
4.2.1.2.2.1. Radiación directa sobre superficies inclinadas $B(\theta)$	07
4.2.1.2.2.2. Radiación difusa sobre superficies inclinadas $D(\theta)$	07
4.2.1.2.2.3. Modelo de Liu y Jordan.	08
4.2.1.2.2.4. Modelo de Temps y Coulson.	08
4.2.1.2.2.5. Modelo de Klucher.	08
4.2.1.2.2.6. Modelo de Hay.	08

4.2.1.2.2.7. Modelo de Pérez.	08
4.2.1.2.2.8. Radición de Albedo R().	09
4.2.1.3. Radiación Global sobre superficies inclinadas G().	10
4.2.2. Modelado de la temperatura.	10
4.3. Modelado de los módulos fotovoltaicos.	11
4.3.1. Cálculo de la corriente de saturación en cortocircuito I_{SCG}	12
4.3.2. Cálculo de la tensión en circuito abierto V_{OCG}	12
4.3.3. Cálculo de la resistencia serie R_{SG}	13
4.3.4. Obtención de I_G utilizando métodos iterativos.	14
4.3.5. Obtención de la potencia de salida.	15
4.4. Modelado de las pérdidas del generador fotovoltaico.	15
4.5. Modelado del convertidor DC/AC.	15
4.6. Criterios de dimensionado.	16

5. Análisis y simulación de sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa. **V**

5.1. Introducción.	01
5.2. Bases físico-químicas de funcionamiento	01
5.2.1. Definición de una planta de ósmosis inversa	01
5.2.2. Descripción del proceso	01
5.2.3. La salinidad del agua.	03
5.2.4. Composición química del agua.	04
5.2.5. Otros parámetros característicos del agua	07
5.2.6. Parámetros operativos en un sistema OI.	09
5.2.7. Aplicaciones de la Ósmosis Inversa.	13
5.3. Tecnología de las plantas de ósmosis inversa.	13
5.3.1. Membranas de Ósmosis Inversa.	13
5.3.1.1. Introducción	13
5.3.1.2. Membranas de Acetato de Celulosa (AC).	14
5.3.1.3. Membranas compuestas de Poliamida (PA).	15
5.3.1.4. Membranas de arrollamiento en espiral.	16
5.3.1.5. Clasificación según la presión de trabajo	17
5.3.2. Pretratamientos en la desalación.	18
5.3.2.1. Introducción.	18
5.3.2.2. Pretratamientos Físicos.	19
5.3.2.3. Pretratamientos Químicos.	23
5.3.2.4. Factores a tener en cuenta en el diseño del pretratamiento de aguas para OI.	26
5.3.3. Post-Tratamiento.	27
5.3.3.1. Introducción.	27
5.3.3.2. Ajuste de pH.	28
5.3.3.3. Descarbonatación o desgasificación.	28
5.3.3.4. Post- cloración.	29
5.3.4. Bomba de Alta Presión	29
5.3.4.1. Introducción	29
5.3.4.2. Tipos de bombas	30
5.3.5. Circuitos de presión.	34
5.3.5.1. Introducción	34
5.3.5.2. Válvulas de regulación	35
5.3.5.3. Recuperadores de energía	35
5.3.5.4. Ventajas y desventajas de colocar un sistema recuperador de energía en instalaciones OI energéticamente autónomas.	44
5.3.6. Instrumentación, control y auxiliares.	45
5.4. Operación de las plantas de ósmosis inversa.	46

5.4.1. Termodinámica del proceso.	46
5.4.2. Cálculo de la presión osmótica.	49
5.4.3. Sistemas de membrana.	53
5.4.3.1. Polarización de la Concentración.	53
5.4.3.2. Principios de rechazo.	56
5.4.3.3. Efectos sobre el rendimiento.	58
5.5. Diseño de sistemas.	61
5.5.1. Criterios de diseño.	66
5.5.2. Recuperación de energía.	67
5.6. Modelos matemáticos de simulación.	70
5.6.1. Fenómenos de transporte en membranas.	70
5.6.1.1. Introducción.	70
5.6.1.2. Modelo teórico de solución-difusión.	71
5.6.1.3. Modelo de solución lineal de difusión.	71
5.6.1.4. Modelo de la teoría del film.	73
5.6.1.5. Modelo de acoplamiento.	73
5.6.2. Programas de los fabricantes.	74
5.6.2.1. Modelo de FILMTEC.	74
6. Descripción de los equipos utilizados.	VI
6.1. Introducción.	01
6.2. Descripción de la planta.	02
6.2.1. Descripción del proceso.	03
6.2.1.1. Pretratamiento.	03
6.2.1.2. Bomba de alta presión.	04
6.2.1.3. Membranas y módulo de ósmosis inversa.	08
6.2.1.4. Sistema de limpieza.	10
6.2.1.5. Tuberías.	10
6.2.1.6. Características del agua de la planta.	10
6.2.1.7. Instrumentación y Sistema de control.	11
6.2.1.7.1. Sistema de control.	12
6.2.1.7.2. Instrumentación.	13
6.2.1.7.3. Autómata programable.	22
6.2.1.8. Variador de velocidad.	25
7. Integración de la energía eólica con la planta de ósmosis inversa.	VII
7.1. Curva Característica de una Planta de O. I.	01
7.2. Régimen Variable.	03
8. Simulación del proceso energía eólica –desalación.	VIII
8.1. Consideraciones preliminares.	01
8.1.1. Unidades.	01
8.1.2. Nomenclatura.	02
8.1.3. Membranas.	03
8.2. Análisis del agua de alimentación.	04
8.2.1. Cálculo de la Concentración de Sales en el Caudal de Alimentación.	05
8.2.2. Cálculo de las Concentraciones en ppm de NaCl.	05
8.2.3. Cálculo de la Presión Osmótica.	06
8.2.4. Cálculo de las Concentraciones en meq/l.	07
8.2.5. Cálculo de las Concentraciones en mg/l de CaCO ₃	08
8.2.6. Cálculo de la Fuerza Iónica.	08
8.2.7. Cálculo del pH en el Concentrado.	09
8.2.8. Cálculo del Índice de Langelier.	09
8.2.9. Control de Incrustación.	10

8.3.	Cálculo de las variables dentro de un tubo.	11
8.3.1.	Conocidos el Caudal y la Presión de Entrada.	11
8.3.2.	Conocidos el Caudal de Entrada y la Conversión.	15
8.3.3.	Cálculo del Rango de Operación del Sistema.	17
8.4.	Análisis de los datos de viento.	21
8.4.1.	Corrección de la Densidad del Aire.	21
8.4.2.	Corrección de la Velocidad del Viento con la Altura.	22
8.4.3.	Análisis de los Datos de Velocidad.	23
8.4.4.	Análisis de los Datos de Dirección.	24
8.4.5.	Curva de Potencia del Aerogenerador.	25
8.4.6.	Densidad de Potencia.	27
8.4.7.	Distribución Anual de Potencia.	28
8.5.	Régimen variable.	29
8.5.1.	Relación entre Velocidad, Potencia y Caudal.	29
8.5.2.	Distribución Anual de Caudal.	30
8.6.	Programa de simulación: Caso práctico.	31
8.6.1.	Descripción del Programa.	31
8.6.2.	Caso práctico.	32
8.6.2.1.	Definición.	32
8.6.2.2.	Análisis del Agua de Alimentación.	34
8.6.2.3.	Configuración de la Planta.	35
8.6.2.4.	Punto de Funcionamiento.	36
8.6.2.5.	Rango de Operación.	38
8.6.2.6.	Cálculo de la Distribución de Potencia del Aerogenerador.	46
8.6.2.7.	Análisis del Régimen Variable.	54
9.	Estudio Energético de la Planta.	IX
9.1.	Análisis de la planta: Introducción.	01
9.2.	Parámetros de operación de la planta de ósmosis inversa.	01
9.2.1.	Estado transitorio.	02
9.2.2.	Presión y caudal.	03
9.2.3.	Conductividad.	05
9.2.4.	Caudal de Rechazo.	05
9.3.	9.3. Coeficiente de transferencia de masa.	10
9.4.	9.4 Energía en el proceso de ósmosis inversa.	14
9.5.	9.5 Diagrama energético.	21
10.	Resumen y Conclusiones.	X
10.1.	Resumen.	01
10.2.	Resultados.	02
10.3.	Conclusiones.	05
	Bibliografía.	B

Introducción general

1.1 El binomio energías renovables - desalinización

Desde el inicio de la Revolución Industrial la energía ha sido uno de los factores fundamentales que han impulsado el desarrollo y progreso de los pueblos.

En el periodo comprendido entre las postrimerías del siglo XVIII y nuestros días los modelos económicos y sociales de las sociedades industrializadas se han visto marcados por las características de las fuentes energéticas (carbón y petróleo¹, fundamentalmente) dominantes en cada periodo. Durante este periodo el interés de los gobiernos europeos por las energías renovables, en especial por la energía eólica, ha estado ligado a diversas circunstancias.

En una primera etapa las políticas energéticas renovables son impulsadas por los diversos gobiernos como consecuencia de los periodos de escasez de petróleo originados por las dos Guerras Mundiales. Sin embargo, en las dos ocasiones, a medida que las crisis desaparecían y las economías se restablecían, el superior coste de la energía eléctrica de origen renovable respecto a la generada con el petróleo conducía al abandono de las energías autóctonas renovables.

La crisis del petróleo de 1973, y sobre todo la de 1979, propician una segunda etapa de impulso de las energías renovables (eólica y solar principalmente), pero esta vez marcada por circunstancias radicalmente distintas a la de la etapa anterior. En esta etapa los precios de la energía eléctrica de origen eólico son capaces de competir con los generados por la nueva estructura de precios del petróleo.

En la década de los 90, a la dependencia energética respecto del exterior y al probable agotamiento de los recursos petrolíferos para mediados del siglo XXI, se le suma la preocupación social, en amplios sectores de los países más desarrollados, por el medioambiente, Pérez (1998)

¹ A partir de las primeras décadas del siglo XIX, los centros de consumo se han aprovisionando principalmente de combustibles procedentes del petróleo.

La oportunidad de aprovechar las fuentes de energía renovable y conseguir que éstas representen en Europa un porcentaje significativo en el consumo real de energía primaria, fue primeramente asumido en Septiembre de 1993, por el programa Altener de la Comisión Europea y, posteriormente, en 1994, por una amplia representación de los principales actores que intervienen en el sector de las renovables, a través de la declaración de Madrid. Así, mientras el Altener, programa exclusivo de las energías renovables, pretende una reducción de emisiones a la atmósfera de 180 millones de toneladas de CO₂ en el año 2005, y para ello considera necesario alcanzar una cobertura del 8% con renovables en la demanda total de energía en ese año, la Declaración de Madrid propugna sustituir el equivalente al 15% de la demanda de energía primaria convencional antes del año 2010.

Uno de los factores que condicionan, en la actualidad, que las energías renovables no sean una alternativa a las energías convencionales deriva esencialmente de la distribución temporal de aquellas, que al depender de la época del año y de la hora del día impiden satisfacer una demanda energética prefijada. Estos inconvenientes asociados a la variabilidad de las energías renovables, que originan que las mismas sean catalogadas de complementarias pero no de alternativas, podría paliarse si la energía producida se pudiese almacenar para una posterior adaptación a la demanda. En el caso concreto de las energías eólica y solar el almacenamiento en forma de energía eléctrica es solo practicable en la actualidad cuando las cantidades implicadas son relativamente pequeñas. Una medida que podría subsanar este inconveniente sería la de sustituir el almacenamiento de la energía eléctrica de origen renovable por el del producto de un proceso del que existiese gran demanda y no fuese perecedero, ya que de esta manera se podría optimizar el aprovechamiento del viento, de manera que el bien almacenado satisficiese la demanda de forma regular.

Si se tiene en cuenta que en el Mundo existen amplias zonas desérticas, muchas de las cuales han tenido que recurrir a la potabilización de agua de mar con energías convencionales como medio de subsanar la escasez del preciado líquido, y que algunas de dichas regiones disponen de adecuados potenciales eólicos y solares, se llega a la conclusión que el Almacenamiento del viento en forma de agua potable podría ser una solución óptima para el aprovechamiento de este tipo de energías. En este sentido son varios los estudios teóricos y experimentales que se han llevado a cabo en los últimos años.

Con anterioridad a esta tesis se han realizado diversos estudios que tratan de la desalinización de aguas utilizando como fuente energética las energías renovables. Una de las referencias teóricas más antiguas que disponemos es de Salomon (1968), que analiza teóricamente los aspectos técnicos de la desalinización con energía eólica, y concluye que los métodos de compresión de vapor pueden ser muy apropiados para ser accionados mediante turbinas eólicas, ya que las bombas centrífugas y compresores tienen la propiedad de presentar el mismo tipo de variación cúbica de la potencia en función de la velocidad de rotación que los motores eólicos.

Alward et.al. (1973) estudiaron mediante un ensayo de laboratorio la viabilidad de accionar una unidad de osmosis inversa con una turbina eólica, para producir agua potable en Barbados. Para ello someten a unas membranas de osmosis inversa a un flujo senoidal, pretendiendo simular la variación de la velocidad del viento, y a una presión constante de 42.2 Kg/cm². El caudal de alimentación estaba constituido por una solución de agua y cloruro sódico con una concentración de 3500 ppm. Los resultados después del octavo mes de ensayos les indican que el funcionamiento con flujo senoidal no difiere significativamente del funcionamiento en condiciones constantes.

Cadwallader et. al. (1977), llegan a la conclusión, después de un análisis teórico, que la aplicación de la energía eólica para la desalinización de aguas salobres, tanto con osmosis inversa como con electrodiálisis, puede ser una solución económica al incremento de los costes de los combustibles convencionales. Además añaden en el mencionado informe que el acoplamiento de turbinas eólicas con plantas de osmosis inversa o de electrodiálisis pueden ofrecer, en teoría, ventajas técnicas, ya que el caudal de alimentación se puede adaptar a la variación de la energía eólica, optimizándose el aprovechamiento del viento. Por último advierten que todavía no se conocen los efectos del funcionamiento con densidad de corriente o caudal variable para sistemas de electrodiálisis o de presión o caudal variable en sistemas de osmosis inversa.

Petersen et. al. (1979) presentan dos proyectos de demostración donde se usa energía solar y eólica para el funcionamiento de unidades de desalinización por osmosis inversa en una isla (Suderoog) en la costa alemana del Mar del Norte. Fries et. al (1981), comunican las fechas de instalación de la unidad de osmosis inversa y del aerogenerador en la isla de Suderoog, señalando el inicio de la puesta en funcionamiento. En las dos últimas comunicaciones se realiza una descripción general de este proyecto de demostración. El aerogenerador utilizado es un Allgaier/Hutter de 10 m. de diámetro de rotor con una potencia de 6 kW. a una velocidad del viento de 9 m/s. Las membranas usadas tienen un área de 30 m² y son del tipo plato desarrolladas por GKSS en Alemania. El máximo caudal de agua producto obtenido es de 9m³/día partiendo de un agua de 28000 ppm. con una potencia de 4 kW. (operando a una presión de 80 bar). Se usa una batería para evitar los problemas ocasionados por la variación de la potencia de entrada, especialmente cuando existen frecuentes arranques y paradas.

Según Petersen et al (1983) y McBride et al (1987), en 1982 las membranas fueron sustituidas por otras que presentaban mejor resistencia a los arranque y paradas. Estas nuevas membranas con un área de 10.6 m² funcionan a una presión de 60 bar. produciendo un caudal máximo de agua de 4.8 m³/día. También el aerogenerador Allgaier/Hutter fue sustituido por un aerogenerador Aeroman bipala con 11 m. de diámetro de rotor y una potencia de 11 kW. Otra característica del diseño es el sistema de control que es capaz de ajustar la frecuencia del aerogenerador de corriente alterna a 50 Hz. en todo el rango de velocidades del viento,

permitiendo un acoplamiento directo al sistema de osmosis inversa sin necesidad de baterías. La planta funcionó por un periodo de un año desde agosto de 1982 a julio de 1983. Según las dos últimas referencias, la planta de osmosis inversa aparentemente no presentó efectos desfavorables debido a los ciclos continuos de arranques y paradas, inevitablemente debido a la naturaleza intermitente del viento. Sobre la cuestión de cómo y cuando se permitió arrancar la planta de osmosis inversa, parece ser que se llegó a un criterio de comprobar si durante 20 minutos seguidos la velocidad del viento era superior a la de arranque del aerogenerador antes de iniciar la conexión de la planta de osmosis. Una vez establecido este criterio no se presentó ningún problema con la planta, siendo su funcionamiento perfectamente satisfactorio.

Otra experiencia práctica es la publicada por Laurel (1979), que comunica el periodo de ensayo que dos prototipos, en la isla de Planier, cerca de Marsella (Francia). Uno constituido por una planta de osmosis inversa con una capacidad de producción de 2.5 m³/h. A partir de agua de 2 gr/l y que funciona con energía solar, y otro constituido por una unidad de osmosis inversa con una capacidad de 0.5 m³/h a partir de agua de mar con 39 gr/l y que funciona con un aerogenerador de 4 kW. a 7 m/seg. Las membranas utilizadas son 'Permasep' de Dupont. El aerogenerador es un Aerowatt modelo 4100FP7 con un diámetro de rotor de 9.2 m. Además se utiliza una turbina Pelton para recuperar la energía del agua de rechazo.

Libert y Maurel (1981), informan que otra unidad desalinizadora accionada con energía eólica está programada para suministrar agua a un pueblo aislado de una isla del Pacífico.

McBride et. al. (1987) comentan la experiencia francesa de la isla de Planier, e indican que los principales problemas que se presentaron fueron los frecuentes arranques y paradas, particularmente cuando la velocidad del viento se encontraba próxima a la velocidad de arranque de la eólica. Según el mencionado artículo, de los estudios económicos que se realizaron con diversas alternativas, favorecieron a los sistemas que empleaban motores de corriente continua y baterías, señalándose además que puede esperarse un costo del agua comparable al de un sistema de desalinización convencional.

Con posterioridad a esta fecha se han seguido desarrollando pequeñas unidades de desalinización con la tecnología de ósmosis inversa, accionadas, bien con energía procedente de aerogeneradores o con energía procedente de aerogeneradores y sistemas fotovoltaicos (Robinson et al., 1992; Liu et al, 2002 ; Weiner et al, 2001; Houcine et al, 1999; Kershman et al., 2005; Tzen et al., 2008). Asimismo, se han desarrollado microredes donde la fuente energética ha sido híbrida. Es decir, ha contado con fuentes renovables y convencionales de energía. Como ejemplo destacado de dichas microredes puede señalarse un sistema eólico-diesel instalado en la isla de Fuerteventura (Carta y González, 2001; Carta et al, 2003b; Carta 2010)

Hay que señalar que la inmensa mayoría de los proyectos de desalinización con renovables que han sido propuestos, se han centrado en la pequeña escala y se han diseñado para

funcionar en régimen constante de presión y caudal. Para ello, se ha recurrido al empleo de sistemas de almacenamiento energético, fundamentalmente baterías. Por tanto, los motores y bombas que integran el sistema de desalinización operan en régimen nominal, garantizando en todo momento el caudal nominal y la calidad del agua para los que la planta fue diseñada. Sin embargo, han sido escasos los trabajos realizados con el objetivo de determinar la viabilidad técnica de operar una planta de OI en régimen variable, para poder optimizar la energía fluctuante procedente de fuentes renovables con las que éstas pueden ser alimentadas.

En este sentido, hay que señalar que en literatura científica se han divulgado diversos trabajos que analizan la viabilidad técnica y económica de operar plantas de OI con energías procedentes de fuentes renovables.

Feron (1985), lleva a cabo un estudio teórico para determinar la viabilidad técnica y económica del funcionamiento de plantas de osmosis inversa utilizando energía eólica, combinando las características de la planta de desalinización con las características del motor eólico (idealizado) y las características del viento (utilizando la distribución de Weibull).

Tres son las posibles configuraciones del sistema planta desalinizadora - turbina eólica que analiza: a) Planta desalinizadora funcionando en condiciones constantes, donde la turbina eólica, de una potencia adecuada, se conecta a la planta solamente en el margen de velocidades que proporciona la potencia nominal b) Planta desalinizadora funcionando en condiciones variables, dependiendo de la velocidad del viento. Aquí la turbina se acopla a la planta cuando aquella suministra la mínima potencia requerida por ésta c) Planta desalinizadora en la que se varía continuamente el área de las membranas, funcionando cada elemento de membrana en condiciones constantes.

Warfel (1988), presenta un artículo donde se resumen los resultados de un estudio analítico llevado a cabo en la Universidad de Massachusetts para determinar la viabilidad técnica y económica de sistemas de desalinización de osmosis inversa accionados por energía eólica. El principal objetivo de este trabajo es tener un modelo del sistema que contemple los componentes disponibles comercialmente para determinar su rendimiento económico actual. Aunque en orden a investigar las posibilidades de tales sistemas los autores indican que han realizado el estudio de 9 diferentes configuraciones del binomio eólico - osmosis inversa funcionando bien autónomamente bien conectado a la red, en el mencionado artículo solo se indican los resultados de los tres más representativos.

Con el propósito de tener una base de comparación, todos los sistemas configurados se comparan con el sistema grupo diesel- osmosis inversa. Dos de los sistemas son grupos eólico - diesel autónomos, que difieren uno de otro del modo de utilizar los módulos de osmosis inversa. El tercer sistema considerado presenta un diseño mecánico, que permite acoplar la eólica a la bomba de alta presión de la planta de osmosis inversa. Según los autores la

fiabilidad de variar el número de módulos que entran o salen de una línea, que es una de las hipótesis consideradas, necesita más investigación. Señalan que existen indicaciones sobre la inconveniencia de que flujos frecuentes atraviesen las membranas de osmosis inversa. Asimismo indican que futuros modelados de estos sistemas deben incluir la consideración relativa a la duración.

Carta (1991), estudia la viabilidad técnico-económica de sistemas de desalinización accionados por energía eólica, en la isla de Fuerteventura (Islas Canarias-España). Este estudio coincide con el de Warfel (1988) en el hecho de considerar la utilización de elementos comerciales. Sin embargo, discrepa en la metodología, magnitud del sistema analizado, y en las conclusiones.

Dos son las alternativas consideradas por Carta (1991) en el estudio respecto a la fuente energética: a) Sistema parque planta aislado, no conectado a la red general eléctrica insular b) Sistema parque planta integrado en la red general eléctrica insular.

En cuanto a las condiciones de funcionamiento de las plantas desalinizadoras el análisis contempla los siguientes sistemas: a) Planta desalinizadora de capacidad variable y condiciones de funcionamiento constante. b) Planta desalinizadora de capacidad fija en condiciones de funcionamiento variables y c) Planta desalinizadora de capacidad variables y condiciones de funcionamiento variables.

Las conclusiones más sobresalientes del trabajo son: La viabilidad técnica y económica de la desalinización de agua de mar, a gran escala, con el empleo de energía eólica. Esta posibilidad se extiende tanto a los sistemas parque-planta aislados de la red como conectados a ella. Sin embargo, aún cuando las repuestas teóricas del estudio indican la viabilidad de la utilización a gran escala de la energía limpia del viento en la desalinización de agua de mar, se señala que la aplicación de la energía eólica debe comenzar con la decisión de experimentar a pequeña escala los resultados alcanzados en la mencionada fase teórica, en especial en el comportamiento de los distintos elementos que integran la planta "modulada", para que las experiencias más amplias que en el futuro puedan realizarse avancen sobre bases mas firmes donde poder apoyarse.

Carta et. al. (1995), presentan la simulación de la producción de agua con energía eléctrica de origen eólico en una planta experimental que el Gobierno Autónomo Canario desea construir en la isla de Gran Canaria (Islas Canarias-España). El proyecto que se pretende llevar a cabo consiste en la conexión de un aerogenerador con una planta de osmosis inversa de capacidad variable² y condiciones de funcionamiento constantes.

² Plantas de desalinización independientes que pueden ser conectadas y desconectadas a voluntad con objeto de que se ajusten a la variación energética.

Cruz et. al. (1996) comunican la presentación al programa europeo Joule III de un proyecto que consiste en un parque eólico compuesto por dos aerogeneradores de 250 Kw. cada uno conectados a tres plantas de desalinización, cada una con diferente tecnología de desalinización (osmosis inversa, electrodiálisis y compresión de vapor).

González et. al (1997) describen el sistema de control y adquisición de datos del proyecto presentado por Cruz et al., (1996) y que está siendo llevado a cabo en la isla de Gran Canaria, de forma que dicho sistema permita la gestión automática de todos los dispositivos conectados al Parque de Aerogeneradores, así como la adquisición de los datos estimados para cada uno de los dispositivos del sistema.

De la búsqueda de información realizada se desprende que han sido escasos los desarrollos que han perseguido explotar la desalinización, a gran escala, utilizando como única fuente de energía la energía eólica. Entre dichos desarrollos puede señalarse el llevado a cabo en el denominado proyecto SDAWES (Sea Desalination Autonomous Wind Energy System) (Carta et al, 2003a; Carta et al., 2004; Subiela et al, 2004) y el sistema desarrollado por la Compañía Enerco (Paulsen y Hensel; 2005; Paulsen y Hensel,2007).

El proyecto SDAWES fue cofinanciado por la Unión Europea (Programa JOULE III, Contract JOR3-CT95-0077) y en él han participado varios Centros Europeos de Investigación en Renovables (Carta et al, 2004; Subiela et al,2004). Especialmente, dicho proyecto perseguía comprobar la factibilidad de funcionamiento aislado de un parque eólico sin necesidad del auxilio de baterías para el almacenamiento de energía ni de grupos diesel de apoyo, además de analizar los problemas que se pueden presentar con la gestión de cargas de desalinización.

En la figura 1.1 se muestra un esquema general eléctrico y de control del sistema SDAWES, donde se indican los subsistemas del proyecto (subsistema de generación eléctrica, subsistema de control y subsistema de cargas) y los principales componentes de cada uno de ellos.

Como conclusión del proyecto SDAWES se obtiene que es viable, desde el punto de vista técnico, operar plantas de ósmosis inversa en régimen constante y capacidad variable, accionada por un parque eólico que funciona aislado de la red eléctrica convencional.

El Departamento de Desalinización de la Compañía Enercon ha desarrollado un sistema específico de desalinización, el cual incluye un sistema especial de recuperación de energía optimizado para su combinación con los convertidores de energía eólica (Paulsen y Hensel; 2005; Paulsen y Hensel, 2007).

El sistema de desalinización de Enercon está integrado por 4 unidades modulares de ósmosis. La producción de cada unidad se puede ajustar de forma continua entre 7.5 m³/h y 15 m³/h. La

producción mínima de 7.5 m³/h está limitada por el caudal mínimo de agua de alimentación que debe circular a través de las membranas. De manera que el rango de producción de una planta con cuatro unidades comienza a 7.5 m³/h (180 m³/día) y llega hasta 60 m³/h (1440 m³/día). Esta planta puede ajustarse a cualquier producción o necesidades de consumo de potencia dentro de estos límites, manteniendo un bajo consumo específico de energía (2 a 2.5 kW h/m³ para agua de mar)

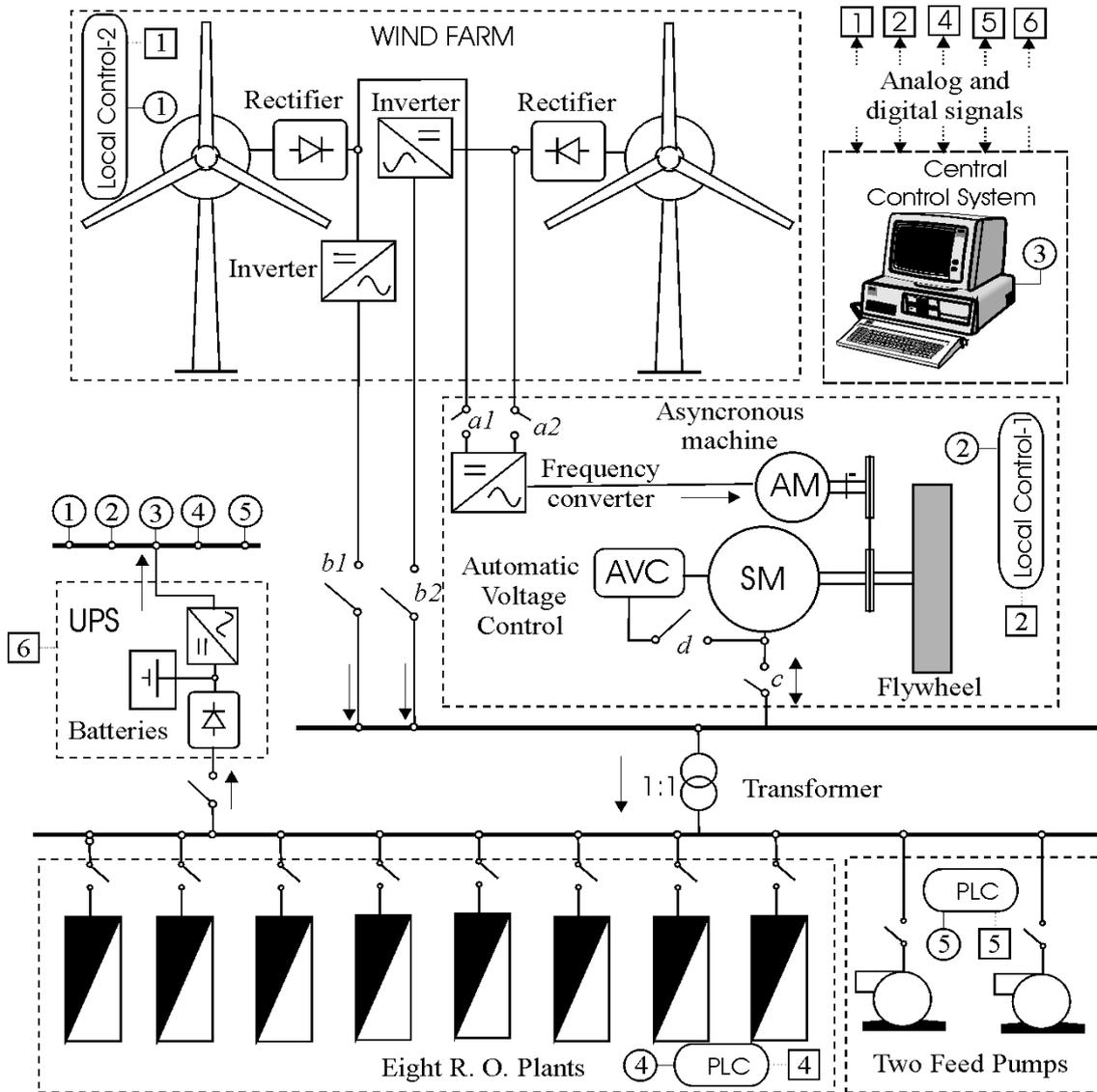


Figura 1.1. Esquema general eléctrico y de control (Fuente: Carta et al,2003a)

El sistema de recuperación de energía (Fig.1.2) consiste en una bomba de baja presión (20 bares) y tres pistones combinados (no es necesario una segunda bomba de refuerzo) El acumulador tipo pistón es capaz de transferir la presión de hasta 70 bares necesaria para el proceso de desalinización.

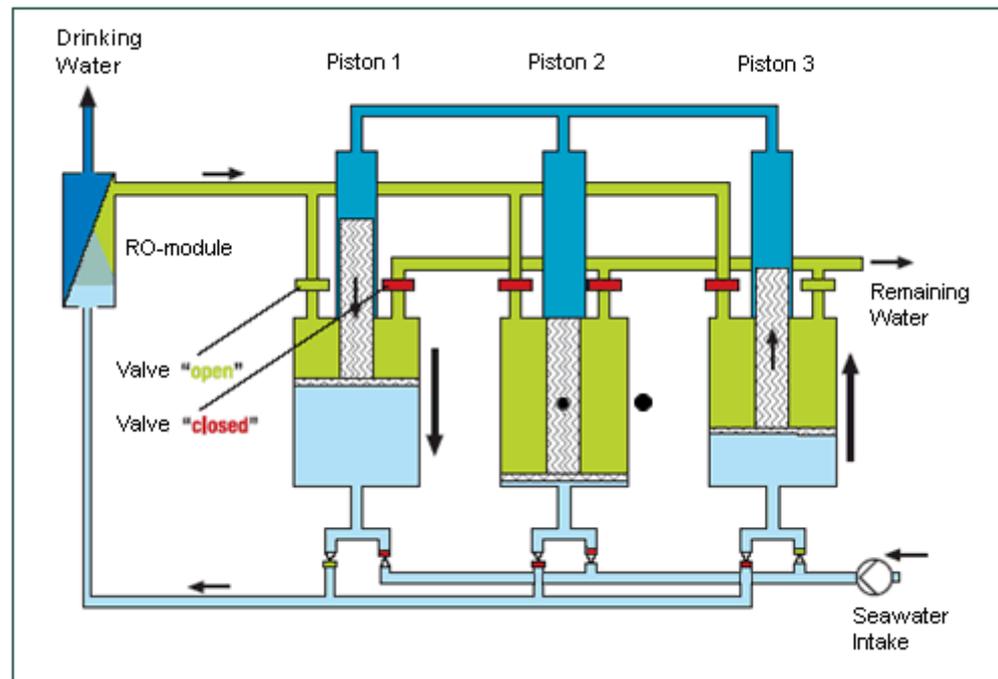


Figura 1.2. Sistema de recuperación de energía de la planta de OI (Fuente: Enercon)

Los componentes básicos de una planta de desalinización de Enercon se muestran en la figura 1.3.

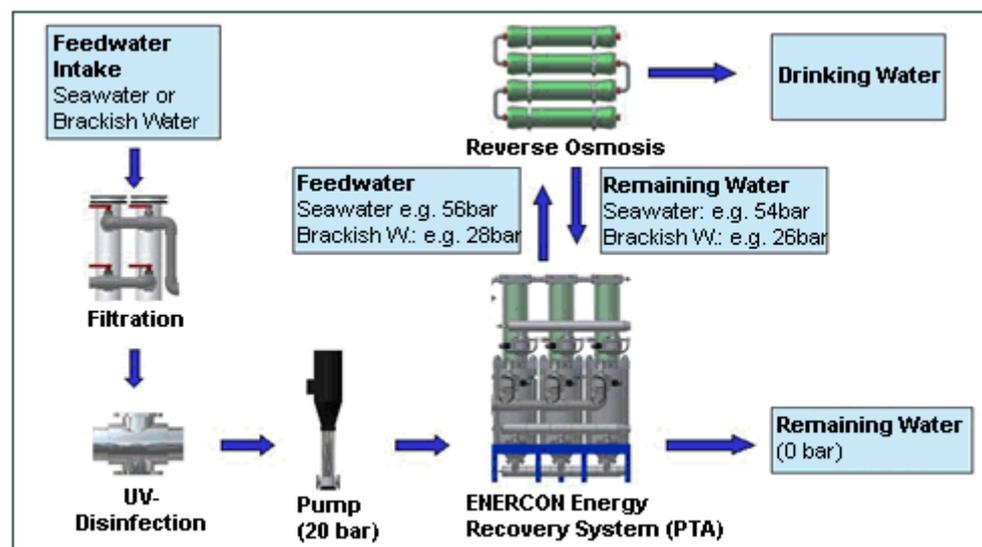


Figura.1.3 Componentes básicos de la planta de OI. (Fuente: Enercon).

Los rasgos característicos de la planta son, según la referencia (Paulsen y Hensel,2007), los siguientes:

- Muy bajo consumo de energía (la recuperación ahorra un 30% de energía)
- No precisa de tratamiento químico. El proceso de control físico elimina las necesidades de tratamiento químico.

- Eficiente ajuste de energía generada: sin reducir el rendimiento, la producción de agua puede ajustarse a la disponibilidad de energía y demanda de agua en el rango 12.5% a 100%.

Del análisis de la información del sistema de desalación de Enercon, divulgada en la literatura científica, se puede concluir que es viable, desde el punto de vista técnico, operar plantas de ósmosis inversa en régimen variable, accionadas por un aerogenerador que funciona aislado de la red eléctrica convencional. Sin embargo, el comportamiento detallado de un tubo de membranas de OI, compuesto por diversas membranas en serie, cuando opera en régimen variable de presión y caudal no ha sido divulgado.

1.2 Objetivos de la tesis

El objetivo de esta tesis doctoral es el estudiar la viabilidad técnica del accionamiento de sistemas de ósmosis inversa por medio de fuentes energéticas no convencionales en distintos supuestos.

Es decir, se pretende realizar un análisis minucioso del comportamiento de membranas comerciales y de la respuesta que ofrece una planta piloto de Osmosis Inversa trabajando en régimen discontinuo, constantes paradas y fluctuaciones sucesivas en presión y caudal conforme a los datos de simulación de potencia procedente de energías renovables (disponibilidad de viento y/o sol), sin necesidad de adquirir los equipos de producción de energía.

Entre los principales objetivos se indican:

- Simulación de entradas de energía renovable en una planta piloto de Osmosis Inversa para trabajar en diferentes modos de funcionamiento considerando las condiciones climáticas de cada uno de los sitios potenciales.
- El estudio del efecto de las discontinuidades y cambios en la disponibilidad de entrega energética en forma de variación de parámetros operacionales.
- El estudio del sistema desde el punto de vista de la vida útil de las membranas que han trabajado con datos de sistemas ER/OI, sus efectos y capacidad de adaptabilidad a situaciones límite, encontrando su punto óptimo de funcionamiento.
- Obtener un amplio rango de trabajo de las presiones de operación en contradicción a la presión ideal de trabajo como sugieren los fabricantes, con una óptima calidad de agua y producción.

1.3 Metodología de la tesis

Con el propósito de alcanzar los objetivos planteados se ha trazado el siguiente plan de trabajo:

1. Investigación Básica. Recopilación y estudio de las fuentes bibliográficas que traten de la desalinización con energías no convencionales, fundamentalmente energía eólica y fotovoltaica. Análisis de los datos climáticos como radiación solar y disponibilidad de viento en áreas geográficas determinadas, simultáneamente un estudio de las cualidades técnicas de las turbinas del viento comerciales y evaluar sus parámetros operacionales, la dispersión de energía, potencia nominal y capacidad de trabajo.
2. Etapa de Laboratorio. Desarrollo de los modelos que permiten simular la generación eléctrica a partir de los datos climatológicos recopilados y los dispositivos de generación de potencia considerados. Se diseña un paquete informático que traduzca los cálculos de disponibilidad de potencia en potencia real a aplicarse en la planta, diseño de software específico para ordenar la interface y para el control del variador de velocidad que actúa sobre el motor de la bomba de alta presión. Establecimiento de los modos de funcionamiento en función de la respuesta otorgada por el trabajo de la planta piloto de RO sometida a una serie de ensayos con membranas comerciales, operando a diferentes presiones y actuando sobre el variador de velocidad que nos permite evaluar la respuesta del sistema y su posterior aplicación en la planta experimental (Oprodes).
3. Diseño de la Planta Oprodes e Instalación. El objetivo en este punto es diseñar una planta de Osmosis Inversa que tenga una gran flexibilidad de trabajo conforme a los modos de funcionamiento estudiados para la planta piloto y las variables establecidas, especialmente la funcionalidad del variador de velocidad, la capacidad de adaptación de la membrana, la actuación de la bomba de alta presión.
4. Operación y Toma de Datos. Funcionamiento de la planta con la aportación de las potencias obtenidas de la simulación de los sistemas de energías renovables; aportaciones de día, mes y estación con promedios de potencia mala, buena y óptima, con las respectivas paradas y arranques y actuando entre presiones de 35 bar hasta 80 bar con cambios en los rpm aportados en períodos de tiempo inicialmente cada minuto (los primeros tres meses) y cada 5 minutos los otros 3 meses posteriores. Simultáneamente, se estandarizó la toma de datos para observar el comportamiento de las membranas a través de información de caudales de entrada y salida, presiones de entrada y salida, conductividad en el agua de aporte, en el producto y el rechazo, control de la temperatura y su incidencia en la productividad. Así mismo, se diseñó de un paquete del software que traduce los cálculos de disponibilidad de potencia en

disponibilidad de potencia real a la planta, adecuando la respuesta al control automático del sistema.

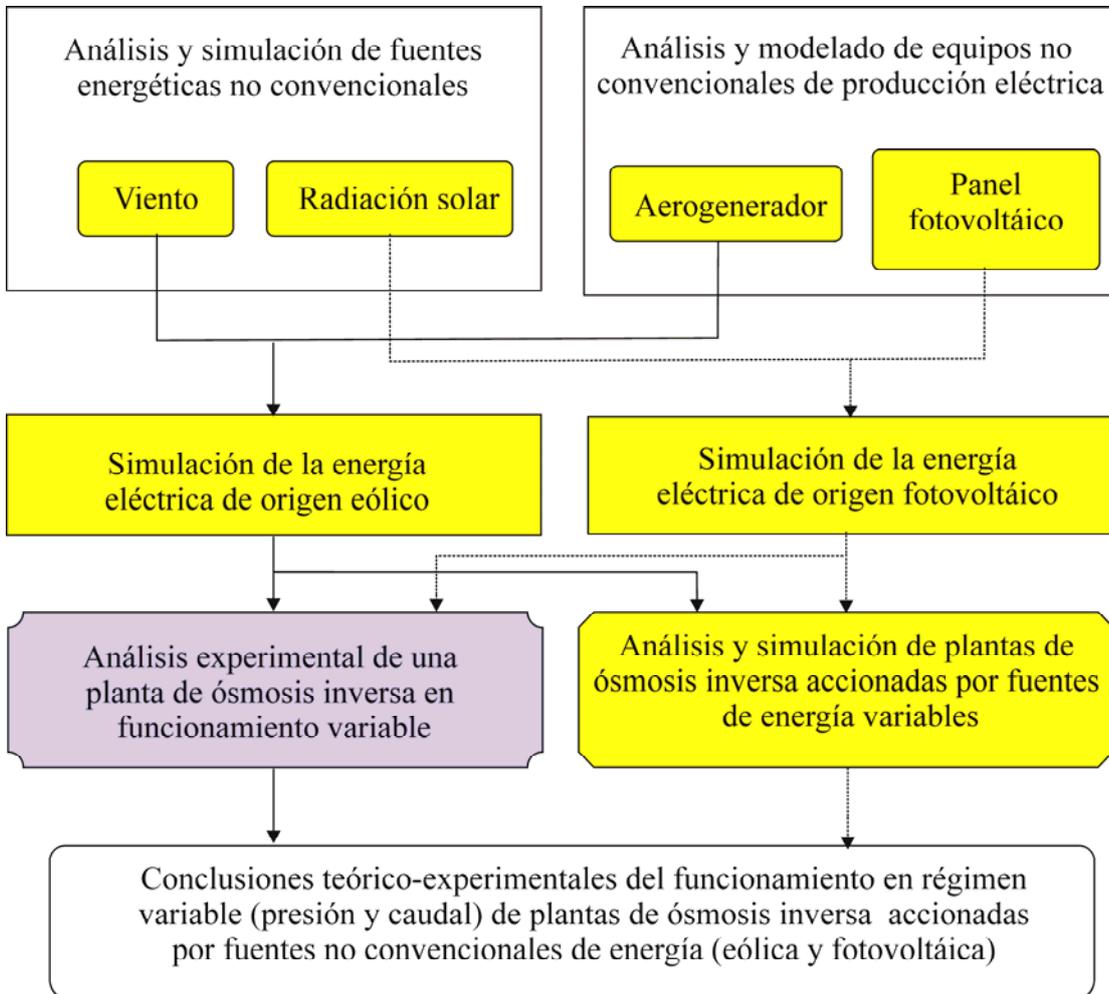


Figura 1.4. Planteamiento general de la metodología de trabajo establecida.

1.4 Estructura de la tesis

El documento de tesis se ha estructurado en 10 capítulos:

- En el capítulo dos se establecen las bases de la integración de las energías renovables en la desalinización de agua.
- En los capítulos tres y cuatro se analiza y simula las energías renovables más extendidas en desalinización: eólica y solar fotovoltaica.
- El capítulo cinco se dedica al análisis y simulación de sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa.

- En el capítulo seis se describen los equipos utilizados en la planta piloto utilizada en la demostración de la presente tesis.
- Los capítulos siete, ocho y nueve sirven para estudiar el proceso de integración de la energía eólica con la planta de desalinización
- En el capítulo diez se presenta un resumen y las principales conclusiones.

Energías renovables y desalación.

2.1 Integración de las energías renovables en el proceso de desalinización

El desarrollo tecnológico alcanzado permite que la desalación de agua del mar sea una aplicación atractiva para las energías renovables. Muchas zonas con escasez de agua desalada, poseen óptimos potenciales energéticos especialmente eólicos y solar, emplazamientos donde el viento es un factor climatológico frecuente, como es el caso de un elevado número de islas mediterráneas, a la vez existe una apreciable escasez de agua potable, que obliga a realizar suministros con altos costos. Igualmente en estas regiones o similares la escasez de agua potable va acompañada de un buen nivel de insolación (exposición a la Radiación Solar).

Además de los factores medioambientales mencionados, existen otros factores que determinan el uso de las energías renovables para la desalación. Uno de estos es la simultaneidad estacional entre la demanda de agua potable y la disponibilidad de dichas energías. En numerosas localidades costeras y centros turísticos, la demanda de agua potable crece notablemente en verano y es ahí cuando la disponibilidad de la radiación solar es máxima.

Estos factores han motivado el desarrollo de proyectos destinados a mejorar y hacer más competitivos los sistemas de desalación de agua de mar con energías renovables, desde el punto de vista medioambiental son claros los beneficios que aportan, el principal problema es la discontinuidad de aporte energético renovable que garanticen suministro continuo y constante de energía sumado la imposibilidad de predecir la producción a corto plazo (Petersen et al., 1979; Libert y Maurel, 1981; Keeper et al., 1985; McBride et al., 1987; Hanafi, 1994; Harrison et al., 1996; Kiranoudis et al., 1997; Hasnain y Alajlan, 1998; Herold et al, 1998; Colangelo et al., 1999; Voivontas et al., 1999; Vujic y Krneta, 2000; Suleimani y Nair, 2000; Belessiotis y Delyannis, 2000; Herold y Neskakis, 2001; Weiner et al., 2001; Belessiotis y Delyannis, 2001; Veza et al., 2001; Carta and González, 2001; García-Rodríguez, 2002; Carta

et al, 2003a; Carta et al., 2003b; Delyannis, 2003; García-Rodríguez, 2003; Tzen y Morris, 2003; Miranda y Infield, 2003; Thomson y Infield, 2003; Goosen et al, 2003; El-Nashar, 2003; Bouchekima, 2003a; Bouchekima, 2003b; Kershman et al, 2003; Carta et al.,2004, Subiela et al., 2004; Kaldellis et al., 2004; Veza et al., 2004; Seibert et al, 2004; Lindemann, 2004; Bouguecha et al., 2005; Papapetrou et al., 2005; Scrivani, 2005; Patel et al., 2006; Mathioulakis et al., 2007; Delgado-Torres y García-Rodríguez, 2007; Gibbons et al., 2008; Bermudez-Contreras et al., 2008; Tzen et al., 2008; Fernández-López et al., 2009; He y Yan, 2009; Henderson et al., 2009; Heijman et al., 2009; Eltawil et al., 2009; Mahmoudi et al., 2009; Gude et al., 2010; Kondili E., 2010; Dehmas et al., 2011).

Por lo tanto, las principales ventajas y desventajas que existen para aplicar las energías renovables a una planta de desalinización sería:

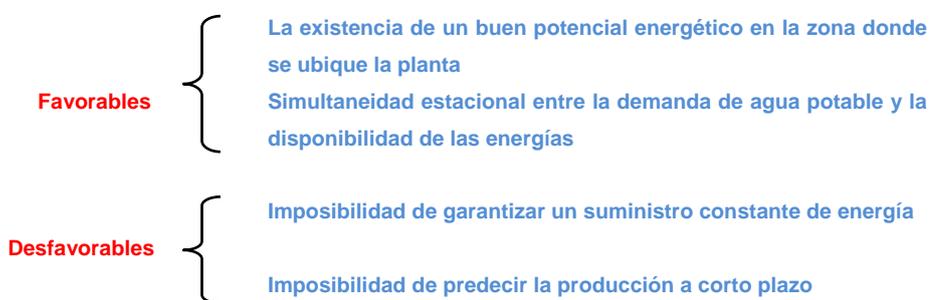


Figura 2.1. Aspectos favorables y desfavorables de la desalinización con energías renovables.

En la tabla siguiente están las combinaciones “*tipo de desalación – energía renovable*” que son factibles de usar en función del tipo de agua y tamaño de la planta. Los sistemas contemplados son: destilación multiefecto (MED), destilación multietapa (MSF), compresión de vapor (VC), electrodiálisis reversible (EDR) y ósmosis inversa (OI).

Existen tres métodos diferentes para incorporar a una planta OI un sistema energético renovable y son:

- Planta OI - E. Renovable con sistema alternativo (Diesel o almacenamiento) aportando los defectos energéticos
- Plantas OI de reducidas dimensiones que irán conectándose y desconectándose en función de la energía disponible
- Planta OI - E. Renovable sin sistemas energéticos alternativos

Esta tesis se enmarca en el tercer tipo de sistemas, en donde la planta produce agua desalinizada si dispone de la energía necesaria. En caso contrario, la planta no estará funcionando.

Esta tesis ha sido producto de un proyecto de investigación, donde se instaló una planta real para comprobar la viabilidad del sistema.

Agua de Alimentación	Agua Producto	Fuente RE disponible	Dimensión del sistema			Sistema Óptimo RE para la planta
			PEQUEÑO (1-50 m ³ /día)	MEDIA (50-250 m ³ /día)	GRANDE (> 250 m ³ /día)	
AGUA SALOBRE	Industrial	Solar	*			Destilación - Solar
	Potable	Solar	*			PV – OI
	Potable	Solar	*			PV – ED
	Potable	Viento	*	*		VIENTO - OI
	Potable	Viento	*	*		VIENTO – ED
AGUA DE MAR	Industrial	Solar	*			Destilación - Solar
	Industrial	Solar		*	*	Solar Térmica MED
	Industrial	Solar			*	Solar Térmica MSF
	Potable	Solar	*			PV – OI
	Potable	Solar	*			PV – ED
	Potable	Viento	*	*		Viento – OI
	Potable	Viento	*	*		Viento – ED
	Potable	Viento		*	*	Viento – VC

Tabla 2.1 Combinaciones desalación - renovables

En el proyecto se ha escogido la energía eólica como fuente energética renovable, por la disposición geográfica donde está instalada la planta OI, zona sureste de la isla de Gran Canaria, con importante potencial eólico, siendo este tipo de energía el apropiado para acoplar a la instalación. El estudio valida cualquier tipo de energía renovable, sustituyendo los valores de potencia que se generan por la turbina eólica, y colocando los correspondientes al sistema renovable que se desee instalar.

Los sistemas de OI alimentados por energías renovables deben considerar una serie de factores intrínsecos de cada tecnología y que sean avalados económicamente. La selección de la tecnología debe observar cuatro aspectos:

- **Calidad del agua de alimentación**
- **Agua producto:** asegurar la demanda diaria y la calidad del producto.
TDS < 500 ppm
- **Requisitos energéticos:** coste específico de producción del agua
- **Potencial energético disponible**

2.2 Estado del arte

2.2.1 Tecnología Eólica

2.2.1.1 Introducción

Los sistemas de conversión de energía eólica o generadores eólicos transforman la energía del viento en energía eléctrica (Burton et al 2001). El viento es una fuente de energía muy variable que no se puede almacenar por lo que los generadores eólicos deben explotarse bajo estas premisas.

Desde antiguo el viento ha ocupado un lugar destacado en la Historia de la Humanidad y prueba de ello es que, junto con el fuego, el agua y la tierra, se le ha asociado un carácter mitológico (Cádiz, 1984, Puig et al, 1982, Carta et al, 2009).

Las primeras aplicaciones de los molinos de viento datan del siglo II AC, si bien estos mecanismos se utilizaban con el propósito de producir sonidos rituales, en determinadas ceremonias religiosas (Cádiz, 1984).

Es en el siglo IX cuando se encuentran referencias escritas sobre la utilización de molinos de viento, durante el siglo XVIII su uso se extendió por toda Europa.

Las primeras aplicaciones de molinos de viento para la generación de electricidad datan de 1887 (Gipe, 1995), cuando Charles F. Brush (1840-1929) construyó un aerogenerador de corriente continua que dedicaba a recargar las baterías del sistema de iluminación de su residencia de Cleveland (Ohio). Otro gran pionero de la energía eléctrica fue Poul la Cour (1846-1908). Este danés llegó a publicar la primera revista de electricidad eólica del mundo, diseñó aerogeneradores e impartió cursos a electricistas eólicos, además de fundar en 1904 la "Asociación de Ingenieros Eólicos de Dinamarca.

La grandes crisis de abastecimiento energético, principalmente durante la Segunda Guerra Mundial y las crisis del petróleo de 1973 y 1979, imprimieron positivos impulsos para el desarrollo de esta tecnología y su aplicación a la generación de electricidad tal y como lo estamos viviendo en nuestros días (Cádiz, 1984).

Las fuentes renovables son recursos que continuamente se están generando a una velocidad similar a la de su consumo por el hombre (solar, eólica, biomasa, etc.)

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables para la que se dispone de una tecnología madura, por lo que su explotación es técnica y económicamente viable, en unas condiciones de producción y coste competitivas con las fuentes de energía tradicionales (EWEA, 2009).

El apoyo que se está dando por parte de los gobiernos a las energías renovables se debe por un lado a la necesidad de encontrar fuentes de energía no convencionales que permitan atender la gran demanda de energía de las sociedades humanas, a la vez que se ahorra el

consumo de combustibles fósiles consiguiendo reducir así el uso de recursos agotables, y por lo tanto, promover un modelo de desarrollo sostenible. Por otro lado, además de conseguir una mayor independencia energética de otros países, se consigue limitar la emisión de gases contaminantes (efecto invernadero).

Las principales ventajas de la energía eólica son las siguientes:

- No hay emisión de gases contaminantes y tampoco utiliza agua.
- Es una fuente de energía renovable, sin requerir procesos de extracción subterráneos o a cielo abierto como ocurre en minería o geotermia.
- Su uso y posibles incidentes en su explotación no implican riesgos ambientales de gran impacto (derrames, explosiones, etc.)
- Ahorra combustibles fósiles y diversifica el suministro eléctrico.

El principal problema asociado a la energía eólica es que el viento es disperso y de gran variabilidad y fluctuación (tanto en velocidad como en dirección), por lo que no todos los lugares son adecuados para una explotación técnica y económicamente viable de energía eólica.

Su impacto medioambiental se produce a escala local y se centra fundamentalmente en los siguientes aspectos y se centra fundamentalmente en los siguientes aspectos:

- *Aumento del nivel de ruido.*
- *Impacto visual.*
- *Impacto sobre la fauna*, es particular sobre aves.
- *Ocupación del suelo.* Los parques eólicos requieren un área de terreno considerable dado que se deben mantener distancias entre aerogeneradores del orden del centenar de metros a fin de evitar los efectos de sombra eólica o de la perturbación de las máquinas entre ellas mismas.
- *Interferencias con transmisiones electromagnéticas.* Los rotores de las centrales eólicas pueden producir interferencias con los campos electromagnéticos y afectar a la transmisión de señales.

A pesar de los efectos medioambientales anteriormente citados, la energía eólica presenta un elevado nivel de aceptación social por parte de la población frente a otros tipos de energía (nuclear, térmicas de carbón, etc.) que muestran unos niveles de rechazo mucho más elevados.

2.2.1.2 Estado del desarrollo mundial

En el año 2010, la capacidad instalada de energía eólica en todo el mundo llegó a los 196'630 Megavatios, luego de 159'050 MW en 2009, 120'903 MW en 2008, y 93'930 MW en 2007. La inversión en nuevas instalaciones tuvo un descenso en muchas partes del mundo. Por primera

vez en más de dos décadas, el mercado para nuevas turbinas fue más pequeño que el año anterior, llegando a 37'642 MW, luego de 38'312 MW en 2009.

China representó más de la mitad del mercado eólico en 2010. Sin tomar en cuenta a China, el mercado mundial se redujo un tercio con un decrecimiento desde 24'512 MW hasta 18'714 MW.

Sin embargo, y a pesar de la desaceleración, la tendencia sigue siendo doblar la capacidad instalada cada tres años. En el año 2010, 83 países, uno más que en 2009, utilizaron la energía eólica para la generación eléctrica. 52 países incrementaron su capacidad instalada, luego de que 49 lo hicieron el año anterior.

El volumen de negocios en el sector eólico alcanzó los 40 billones de euros (55 billones USD) en 2010, luego de que alcanzara los 50 billones de euros (70 billones USD) en el año 2009. El decrecimiento se debe a la baja de los precios de los aerogeneradores.

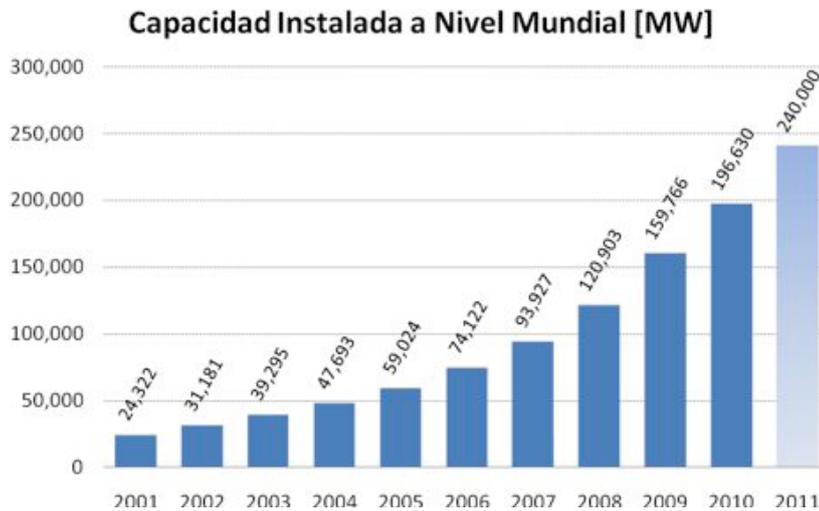


Figura 2.2 Instalación de Energía Eólica en el mundo (WWEA-2011)



Figura 2.3 Nuevas instalaciones de Energía Eólica en el mundo (WWEA-2011)

La disminución fuera de China de la capacidad instalada durante 2010, se puede ver como el resultado de la falta de apoyo político para el fomento de la utilización de la energía eólica.

En una situación paradójica, mas y mas políticos manifiestan su apoyo a la energía eólica, pero tales declaraciones no van de la mano con las decisiones políticas necesarias. Mientras que el año 2009 ha visto dos hitos importantes - la primera ley feed-in en Ontario, América del Norte, y la introducción del primer sistema feed-in en África - el año 2010 no trajo ninguna decisión de alcance similar en las políticas nacionales o internacionales.

Especialmente en los EE.UU., existe una gran incertidumbre con respecto a las regulaciones y no se presta suficiente atención a las energías renovables. También, en muchos países en desarrollo aun existe una enorme brecha en lo que respecta a política. No existe suficiente estabilidad y fiabilidad en las estructuras de mercado así como también la falta de recursos financieros.

Para el final del año del 2010, alrededor de 670'000 personas a nivel mundial trabajan directa e indirectamente en alguna de las distintas ramas del sector eólico. En los últimos cinco años el número de empleos se triplico desde 235'000 en 2005. Existe una creciente demanda de profesionales en distintas áreas, desde ingenieros, trabajadores especializados hasta gerentes y expertos en finanzas, ciencias ambientales y leyes.

La energía eólica en Europa.

Europa sigue representando la región del mundo con la mayor capacidad eólica instalada con un total de 86 GW. Sin embargo, con una disminución de su participación al 43,7 % en la capacidad mundial, el papel de Europa sigue disminuyendo y el tamaño del mercado eólico europeo incluso disminuyó en el último año:

El sector eólico europeo añadió 9'970 MW inferior a los 10'474 MW en el año 2009.

Alemania (capacidad total de 27'215 MW, incremento de 1'551 MW después de un aumento de 1'880 MW en 2009) y España (en total 20'676 MW, incremento de 1'527MW después de un aumento de 2'460 MW en 2009) son, con diferencia, los mayores mercados aunque con tasas de crecimiento muy modestas (5,6% y 8,0%).

Los mercados europeos de tamaño medio con un fuerte crecimiento, alrededor del 20 %, son Italia (5'797 MW, nuevo: 950 MW) Francia (5'660 MW, adicionales: 1'086 MW) y el Reino Unido (5'204 MW agregó: 1'112 MW).

Algunos de los mercados más dinámicos, pero todavía pequeños, se pueden encontrar en Europa del este: Rumania (más que 4'000 % de crecimiento, 591 MW de capacidad total) Croacia (161 %, 70 MW) Bulgaria (112 %, 375 MW) Lituania (69 %,154 MW) Polonia (53 %, 1'107 MW) y Hungría (47%, 295 MW).

También Suiza (139 %, 42 MW) Bélgica (62 %, 886 MW) Turquía (60 %, 1'274 MW) y Chipre (82 MW desde 0) mostraron un crecimiento impresionante.



Figura 2.4 Evolución de la energía eólica en Europa (WWEA-2011)

Los fabricantes de aerogeneradores daneses, alemanes y españoles siguen siendo líderes. Sin embargo, competidores especialmente de Asia (China, India, Corea y Japón) han sido capaces de aumentar sus cuotas de mercado en mercados nacionales e internacionales.

A pesar del estancamiento en 2010, las perspectivas generales en Europa son buenas, teniendo en cuenta los objetivos ambiciosos de muchos países:

En Alemania, se espera llegar a una cuota de energía eólica en el suministro de electricidad de 20-25 % para el año 2020. Esto sería equivalente a 150 TWh o 45 GW de instalaciones en tierra, más 10 GW Offshore.

En España, se esperan 38 GW de capacidad instalada para el año 2020 incluyendo 370 MW en tierra y 3 GW de energía eólica Offshore.

El Reino Unido, líder mundial en energía eólica Offshore, ha establecido un objetivo para el año 2020, de 15 GW en tierra y 13 GW Offshore.

Italia fijó como objetivo llegar a los 12'680 MW instalados al 2020 lo que sería más del doble de su capacidad instalada.

La Energía eólica en España.

Desde mediados de los años 90, la evolución de la potencia instalada eólica ha aumentado espectacularmente desde un 1,54 % en 1998, a un 17,6 % diez años después.

La producción de energía eólica en España es la segunda de Europa y la cuarta del mundo. En 2010 cubrió el 16,6% de la demanda eléctrica y se consolidó como la tercera tecnología que más aporta, tras la nuclear y los ciclos combinados.

El día 18 de abril de 2012 se produjo el máximo histórico de producción instantánea hasta entonces con 16.636 MW a las 16:41. Asimismo se produjo ese día el máximo de producción horaria con 16.455 MWh entre las 17 y las 18 horas y de producción diaria con 334.850 MWh. Esta es una potencia superior (más del doble) a la capacidad de generación de las seis centrales nucleares que hay en España (7.742,32 MW).

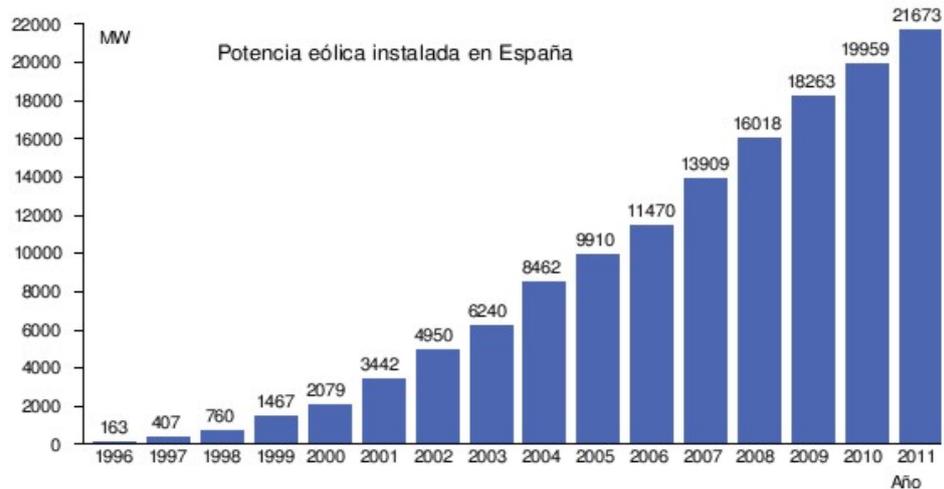


Figura 2.5 Evolución de la energía eólica en España (AEE-2011)

Castilla y León lidera la generación eólica en España, según datos de la AEE. En 2010 instaló 917 MW, el 60% de toda la nueva potencia en el país, y alcanzó un total de 4.803 MW, gracias a sus 204 parques eólicos. Las siguientes comunidades más productoras son Castilla-La Mancha, con 3.709 MW y 121 parques, Galicia, con 3.289 MW y 150 parques, Andalucía, con 2.979 MW y 130 parques, y Aragón, con 1.764 MW y 76 parques.

Las empresas españolas promotoras de esta energía renovable presentan unos datos que las sitúan como líderes a nivel mundial. Iberdrola Renovables fue en 2010 la empresa que más potencia eólica instaló en el mundo: ofrece sus servicios en 23 países. Sus responsables pusieron en marcha 39 parques eólicos en ocho países, con una potencia total de 1.780 MW. El 60% de este total se encuentra en Estados Unidos.

Iberdrola también encabeza el ranking español, con un total de potencia instalada de 5.168 MW y una cuota de mercado del 25%. Acciona Energía, con 4.036 MW y una cuota del 19,5%, y EDPR, con 1.862 MW y una cuota del 9%, son las otras grandes empresas promotoras en España.

En cuanto a los fabricantes de aerogeneradores, Gamesa es la principal empresa, con 9.846 MW y una cuota de mercado del 47,6 %. La otra gran empresa de la fabricación de molinos eólicos es Vestas, con 3.528,72 MW y una cuota del 17,1%.

La energía eólica en Canarias.

Con respecto a la situación en Canarias, en la tabla siguiente se muestra la estimación de potencia y producción de energía eólica en Canarias prevista en el PECAN para el periodo 2005-2015, así como la evolución real de estas magnitudes hasta el 2010 y las nuevas previsiones para el periodo 2011-2015, en base a la información disponible hasta el momento.

Año	CANARIAS (MW)			Tasa de variación anual		
	Revisión	PECAN	Diferencia	Revisión	PECAN	Diferencia
2005	137,11	136,40	0,5%			
2006	137,11	136,40	0,5%	0,0%	0,0%	0,0%
2007	139,48	136,40	2,3%	1,7%	0,0%	1,7%
2008	139,48	309,00	-54,9%	0,0%	126,5%	-126,5%
2009	139,48	544,52	-74,4%	0,0%	76,2%	-76,2%
2010	139,48	590,78	-76,4%	0,0%	8,5%	-8,5%
2011	205,06	656,00	-68,7%	47,0%	11,0%	36,0%
2012	369,59	656,00	-43,7%	80,2%	0,0%	80,2%
2013	522,62	774,21	-32,5%	41,4%	18,0%	23,4%
2014	675,65	964,12	-29,9%	29,3%	24,5%	4,8%
2015	1025,00	1.025,00	0,0%	51,7%	6,3%	45,4%

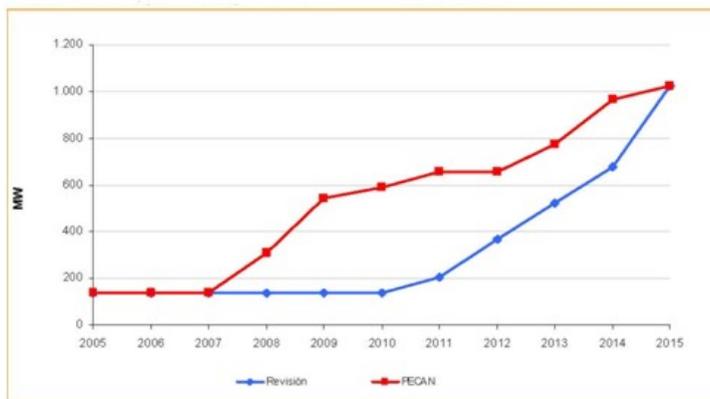


Figura 2.6 Evolución de la instalación de potencia eólica en Canarias (Gobierno de Canarias 2012)

Año	CANARIAS (MWh)			Tasa de variación anual		
	Revisión	PECAN	Diferencia	Revisión	PECAN	Diferencia
2005	329.512	337.058	-2,2%			
2006	345.276	337.058	2,4%	4,8%	0,0%	4,8%
2007	375.054	337.058	11,3%	8,6%	0,0%	8,6%
2008	390.341	676.466	-42,3%	4,1%	100,7%	-96,6%
2009	357.897	1.205.683	-70,3%	-8,3%	78,2%	-86,5%
2010	339.079	1.307.990	-74,1%	-5,3%	8,5%	-13,7%
2011	520.890	1.897.830	-72,6%	53,6%	45,1%	8,5%
2012	930.681	1.897.830	-51,0%	78,7%	0,0%	78,7%
2013	1.311.722	2.203.788	-40,5%	40,9%	16,1%	24,8%
2014	1.692.764	2.482.618	-31,8%	29,0%	12,7%	16,4%
2015	2.513.853	2.808.607	-10,5%	48,5%	13,1%	35,4%

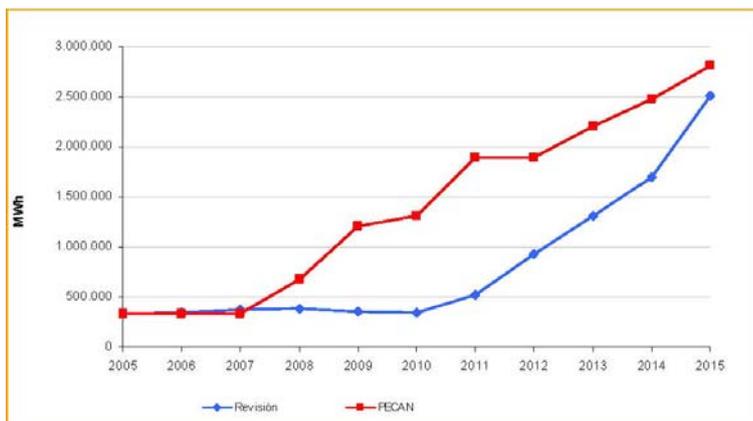


Figura 2.7 Evolución de la producción de energía de origen eólico en Canarias (Gobierno de Canarias 2012)

Tal y como se refleja en las tablas y gráficos anteriores, el PECAN estimaba que tanto la potencia como la producción de energía eléctrica de origen eólico se duplicaría en el año 2008 y nuevamente en el 2009.

Sin embargo, en los últimos años la potencia instalada se ha mantenido en algo menos de 140 MW, sólo un 2% por encima de la potencia con la que se contaba al inicio del periodo de planificación para el conjunto de Canarias, razón por la cual las previsiones de producción tampoco se han cumplido, quedándose claramente por debajo de las estimaciones del PECAN, con diferencias del 74% en 2010.

No obstante se espera que la potencia instalada en Canarias a partir de esta fuente renovable se incremente considerablemente a partir del año 2012, y poder alcanzar así el objetivo del PECAN, consistente en disponer de una potencia total de 1.025 MW en 2015.

Para ello, se ha tenido en cuenta las instalaciones eólicas que actualmente cuentan con autorización administrativa para su instalación, las cuales suponen un potencia adicional total para Canarias de 96 MW, así como las instalaciones que han obtenido asignación de potencia obtenida en el último concurso eólico convocado, destinado a verter toda su energía a la red y que suponen un total de 440 MW adicionales.

Asimismo, se ha considerado que en el año 2015 se añadirá la potencia resultante de un nuevo concurso de asignación de potencia, así como de la autorización de otras instalaciones que en su caso puedan quedar exceptuadas de concursar para la obtención de asignación de potencia, a efectos de completar la potencia total permitida en el artículo 4 del Decreto 32/2006. Con ello, se estima una potencia adicional de 350 MW.

Bajo los anteriores supuestos, los objetivos de potencia instalada en 2015 se mantienen en todas las islas como factibles. No obstante, dado el volumen de instalación de renovables previsto, se podrían producir situaciones en las que los sistemas eléctricos canarios no puedan integrar toda la energía de origen renovable, por lo que las nuevas previsiones de producción de energía eléctrica de origen eólico son inferiores a las previstas inicialmente.

A efectos de asegurar el máximo aprovechamiento de los recursos, la incorporación de sistemas de almacenamiento en los sistemas eléctricos permitiría una óptima integración de las renovables.

2.2.1.3. Tecnologías Disponibles

Existen más de 30 fabricantes de aerogeneradores en el mundo que producen diversos tipos de aerogeneradores. La tecnología de aerogeneradores de pequeña y media potencia (<600 kW) es una tecnología garantizada, los factores de disponibilidad de las máquinas es superior al 90%, alcanzándose el 99% en los de última generación.

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a su potencia nominal en:

- *Miniturbinas (<3 kW)*

Usadas por pequeños consumidores de energía (sistemas aislados de telecomunicaciones, viviendas aisladas, caravanas, barcos, etc.) generalmente producen electricidad que sirve para la carga de baterías de almacenamiento.

Los sistemas de generación eléctrica basados en las miniturbinas eólicas son ideales para aplicaciones diversas que requieren suministro de energía independiente de la red eléctrica convencional, o bien que complementa a ésta. En especial están indicados, entre otros, para los siguientes usos:

- Electrificación de viviendas aisladas y servicios públicos. Viviendas en emplazamientos aislados, refugios de montaña, etc.
- Bombeo de agua, sistemas de riego, iluminación de invernaderos o granjas, sistemas de ordeño, refrigeración, etc.
- Desalinización y depuración de agua, en plantas de pequeña dimensión.

La miniturbina se puede integrar en una instalación mixta, con paneles solares fotovoltaicos o grupos diesel, para mayor efectividad y seguridad de suministro.

- *Pequeños aerogeneradores (<50 kW)*

Este rango de aerogeneradores cubre el mismo tipo de demanda que los anteriores, pero con mayor potencia. Además se usan en sistemas híbridos para abastecer núcleos de población aislados. Estos sistemas combinan la energía eólica con algún otro tipo (grupos electrógenos Diesel, solar fotovoltaica o la propia red eléctrica que facilita energía de apoyo).

- *Grandes aerogeneradores (<850 kW).*

Su función es la producción de electricidad para su inyección en la red. La mayoría de ellos están comprendidos en un rango de potencias nominales entre 200 y 850 kW, con diámetros entre 25 y 55 m.

- *Aerogeneradores multimegavat (>1 MW)*

Con diámetros en el rango de unos 50 a 90 m y altura del buje entre 60 y 100 m, son grandes máquinas que han iniciado su introducción comercial desde el año 2000 y en particular en instalaciones marinas (offshore).

2.2.1.4. Descripción general de un sistema de conversión de energía eólica.

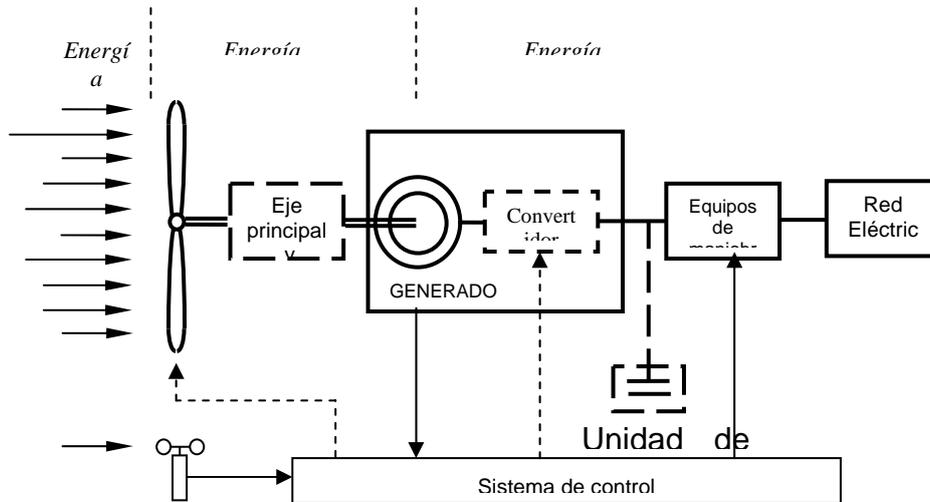


Figura 2.8. Esquema general de un generador eólico.

La Figura 2.8 presenta un esquema general de un generador eólico. Las líneas a trazos indican que se trata de elementos no presentes en todos los generadores eólicos. La turbina eólica convierte la energía del viento en energía mecánica (Burton et al, 2001, Rodríguez et al, 2003). Normalmente tiene 3 palas, que transmiten su movimiento rotacional a un generador por medio de un eje. Generalmente incluyen un multiplicador o convertidor de par, que transforma las bajas velocidades del viento en velocidades más elevadas. Algunas turbinas incluyen sistemas de control del paso de pala con el objeto de regular la cantidad de potencia a transformar. Las que no cuentan con este control se les denomina de paso de pala fija o de entrada en pérdida («efecto stall»).

El generador eléctrico transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores pueden ser síncronos o asíncronos. En el primer caso, si no cuenta con un imán permanente, se debe incluir un sistema de excitación.

También se pueden clasificar según sea su velocidad fija o variable. Los sistemas de velocidad variable necesitan un adaptador electrónico de conexión a la red (bien del rotor o del estator), que puede adoptar configuraciones muy diversas.

Los generadores eólicos, dependiendo de su tecnología y configuración, pueden consumir potencia reactiva y por tanto pueden necesitar unidades de compensación. Las unidades de compensación de potencia reactiva pueden incluir dispositivos de corrección del factor de potencia (activos o pasivos) y filtros. Estos últimos pueden ser necesarios cuando se emplean dispositivos electrónicos para la conexión a la red.

Los equipos de maniobra se pueden diseñar para conseguir una conexión suave a la red.

La energía cinética del viento se convierte en energía mecánica rotacional en forma directa, cuando se extrae por medio de superficies que están en contacto directo y acopladas a motores mecánicos, o en forma indirecta, cuando interviene un elemento intermedio para su conversión. La energía mecánica rotacional puede ser convertida a eléctrica. Los aerogeneradores constituyen el principal elemento de los sistemas de aprovechamiento de la energía eólica, los cuales consisten generalmente de un rotor multipala, un engranaje (caja de velocidades) y un generador eléctrico de tipo sincrónico o asíncrono, desarrollos modernos ha permitido suprimir el engranaje.

2.2.1.5. Sistemas de conversión de energía.

Atendiendo a la velocidad de giro del rotor, las turbinas eólicas se pueden clasificar en dos tipos: de velocidad variable y de velocidad fija (Rodríguez et al, 2003).

En las máquinas de velocidad fija, el generador se conecta directamente a la red. La frecuencia de la red determina la velocidad de rotación del generador. La lenta velocidad de giro de las palas de la turbina se transmite al generador mediante un convertidor de par (multiplicador), con una relación de velocidad por lo general fija. La velocidad del generador depende del número de polos y de la frecuencia del sistema eléctrico.

En sistemas de velocidad variable, el generador se conecta a la red mediante un sistema electrónico convertidor ca/cc/ca, o los devanados de excitación del generador se alimentan de una frecuencia externa mediante un convertidor ca/cc/ca. Así se consigue desacoplar la velocidad de giro del rotor de la frecuencia de la red y que la velocidad de giro del rotor dependa de la velocidad del viento incidente.

Todos los dispositivos pueden estar controlados mediante entrada en pérdida de la pala («efecto stall») o por paso de pala variable.

En los sistemas de paso de pala variable, la potencia mecánica se puede reducir de acuerdo con las características de la turbina.

Las turbinas de «efecto stall» no cuentan con este sistema, así que cuando el viento sobrepasa los límites nominales, un efecto aerodinámico protege o evita que la turbina tome excesiva potencia del viento, eso sí, produciendo ciertas vibraciones.

Los dispositivos actuales se pueden clasificar del siguiente modo:

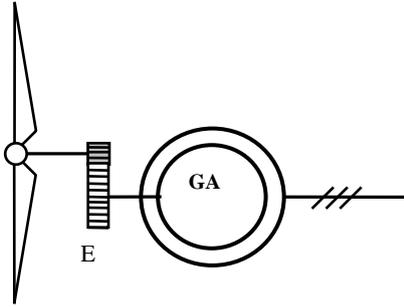
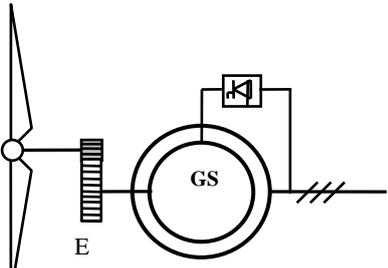
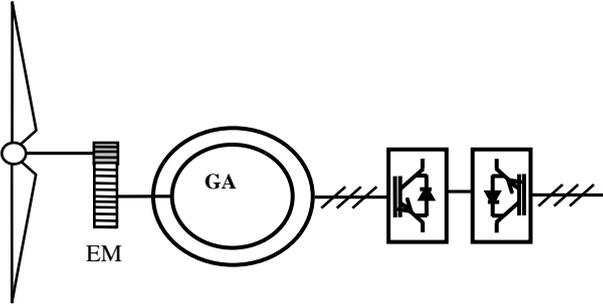
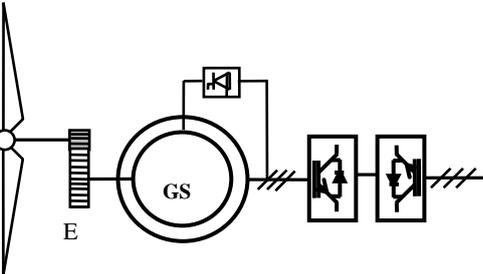
- Turbinas eólicas de velocidad fija directamente conectadas a la red:
 - Turbinas eólicas con generador asíncrono.
 - Turbinas eólicas con generador síncrono.
- Turbinas eólicas de velocidad variable y no totalmente variable:

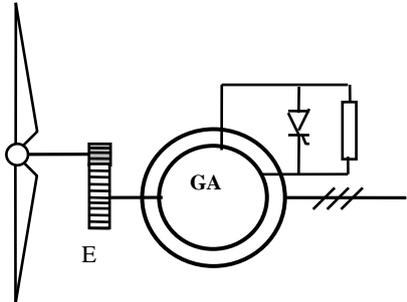
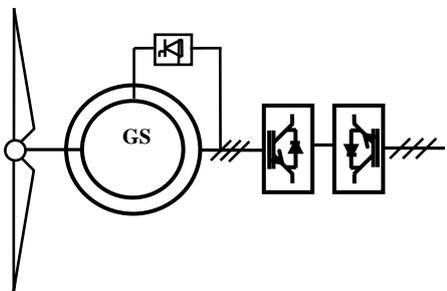
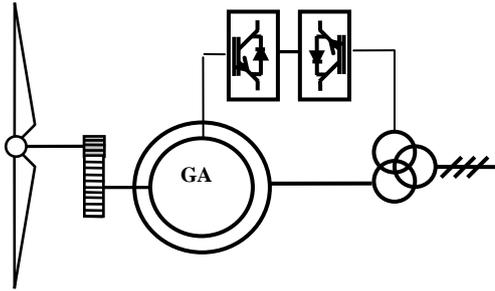
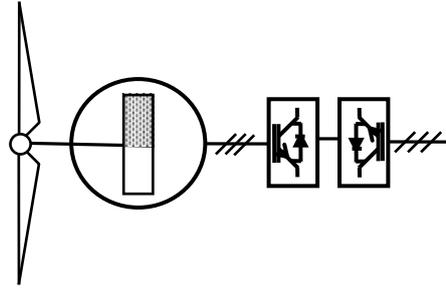
- Generador síncrono o asíncrono con convertidor en el circuito principal (estator).
- Generador asíncrono con deslizamiento variable.
- Generador asíncrono con convertidor en cascada hipersíncrono o hiposíncrono (rotor).

Todos estos sistemas pueden estar regulados/controlados mediante paso de pala («pitch control») o mediante entrada en pérdida («efecto stall»). La figura 2.9 muestra las configuraciones relacionadas anteriormente con alguna característica fundamental.

Los sistemas de velocidad fija presentan la ventaja de su sencillez y bajo coste. Ahora bien, a los generadores asíncronos de velocidad fija, se les debe proporcionar potencia reactiva.

Los sistemas de velocidad variable proporcionan más energía, menos esfuerzos mecánicos y una potencia más suave, esto es menos dependiente de las variaciones del viento y de las oscilaciones del sistema eléctrico. En algunos se puede prescindir del multiplicador («direct driven») al emplear convertidores electrónicos.

GENERADORES ASÍNCRONOS	GENERADORES SÍNCRONOS
<ul style="list-style-type: none"> • MIJA: Conexión directa a la red (A1)  <p> $n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0,08$ consume potencia reactiva </p>	<ul style="list-style-type: none"> • Conexión directa a la red (B1)  <p> $n = f/p$ controla potencia reactiva </p>
 <p> Conexión a la red mediante convertidor ca/cc/ca (A2) $n = 0,8 \dots 1,2 f/p$ Posible control de potencia reactiva (depende del convertidor) </p>	 <p> MSC: Conexión a la red mediante convertidor ca/cc/ca (B2) $n = 0,5 \dots 1,2 f/p$ Posible control de potencia reactiva (depende del convertidor) </p>

GENERADORES ASÍNCRONOS	GENERADORES SÍNCRONOS
<ul style="list-style-type: none"> MIDV: Control dinámico del deslizamiento («opti-slip») (A3).  <p>$n = (1-s) f/p$ $s = 0 \dots 0,1 \dots 0,3$ consume potencia reactiva</p>	<ul style="list-style-type: none"> MSM: Conexión a la red mediante convertidor ca/cc/ca y sin multiplicador (B3).  <p>$n = 0,5 \dots 1,2 f/p$ Posible control de potencia reactiva (depende del convertidor)</p>
<ul style="list-style-type: none"> MIDA: Generador doblemente alimentado (A4)  <p>$n = 0,6 \dots 1,2 f/p$ Control factor de potencia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Excitación de imanes permanentes y conexión a la red mediante convertidor ca/cc/ca (B4).  <p>$n = 0,6 \dots 1,2 f/p$ Posible control de potencia reactiva (depende del convertidor)</p>

EM: engranaje multiplicador
 GA: generador asíncrono
 GS: generador síncrono.

MIJA: máquina de inducción de jaula de ardilla.
 MIDA: máquina de inducción doblemente alimentada.
 MIDV: máquina de inducción de deslizamiento variable .
 MSC: máquina síncrona con multiplicador.
 MSM: máquina síncrona multipolar sin multiplicador.

Figura 2.9. Tecnologías de aerogeneradores.

2.2.1.6. Presencia de las diferentes tecnologías en España

Durante la última década, la generación eólica ha crecido notablemente en España y en otros países europeos, a un ritmo aproximado del 40% anual.

Dicha generación presenta una distribución desigual por Comunidades Autónomas, siendo las Comunidades Autónomas de Galicia, Navarra, Castilla-La Mancha, Aragón y Castilla-León las que cuentan con mayor generación eólica instalada.

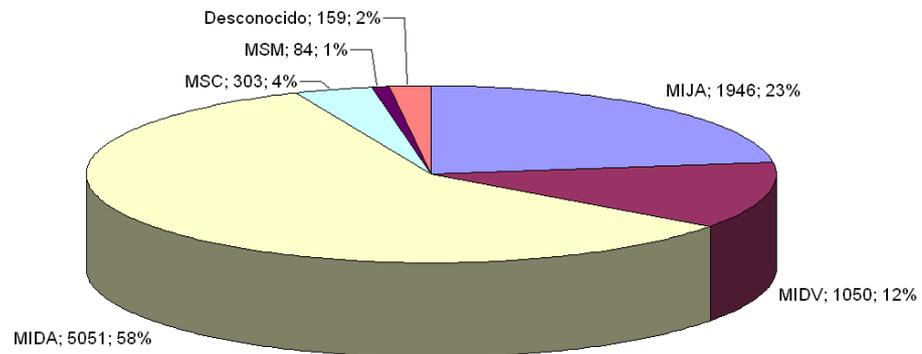


Figura 2.10 (Tecnología; potencia instalada (MW); % sobre 8593 MW) (AEE-2011)

Los aerogeneradores del tipo MIDA (generador asíncrono doblemente alimentado o máquina de inducción doblemente alimentada) son los más extendidos en España, la mayor parte de estos están contruidos por fabricantes nacionales de reconocida reputación. El rango de potencias cubre un amplio espectro, alcanzando los 5 MW. Este tipo de generadores requieren un rotor bobinado y la utilización de un «enlace asíncrono» que desacopla la velocidad del rotor y la velocidad de la red. La potencia total del convertidor ronda el 20% de la potencia nominal del generador.

El sistema MIJA (conexión directa a la red con generador asíncrono o máquina de inducción de jaula de ardilla) esta también muy extendido. Las potencias oscilan desde 50 kW a 2500 kW. Los de mayor tamaño suelen contar con paso de pala variable, o algún tipo de control.

Los del tipo MIDV (máquina de inducción de deslizamiento variable) requieren un rotor bobinado (más caros) que acompañado de electrónica de potencia y sistemas de control (opti-slip, opti-speed) permiten ampliar el margen de velocidades de funcionamiento, con lo que se consigue producir más energía.

La presencia de generadores síncronos es muy reducida (MSC y MSM), las múltiples posibilidades que brinda la electrónica de potencia no justifican el extracoste de un convertidor que debe estar dimensionado para la potencia nominal del generador.

2.2.1.7. Sistema conectado a red

El aerogenerador suministra la potencia necesaria de consumo y permite volcar a la red la generación restante. En vientos calma (producción deficitaria) se consume desde la red. Se utiliza con aerogeneradores de tamaño medio, se requiere de un sistema de adaptación del generador eólico a la red, o bien de la transformación a continua de la energía absorbida de la red.

2.2.1.8. Sistemas aislados

No tienen conexión con la red por inexistencia de la misma, por impedimentos legales, técnicos o preferencia del autoconsumo frente al consumo de red. El consumo suele ser en continua en caso de precisar consumo en alterna se utiliza una etapa inversora.

Generalmente por la incertidumbre del recurso eólico, se acumula energía en baterías electrolíticas, para usarla en periodos de calma, a fin de evitar esta alternativa es necesario realizar un análisis de vientos, frecuencias, máximos periodos de calma, para definir la potencia del generador eólico y la capacidad del sistema de acumulación.

Otro tipo de sistemas son los híbridos integrados, permiten disminuir los periodos de ausencia de energía. El eólico-diesel con su grupo electrógeno otorga la potencia eléctrica que el aerogenerador no supe.

El sistema eólico-solar es utilizado más ampliamente, en periodos de poca disponibilidad de viento se complementa bastante bien con la radiación solar directa, la estrategia está en definir el tamaño de las baterías, de las placas y del aerogenerador,

El sistema eólico-hidráulico depende de la disposición de caudal, en periodos de estiaje puede turbinarse agua dependiendo su periodo máximo de autonomía para diseñar la capacidad de las baterías.

2.2.1.9. Costes

La optimización de componentes y la optimización en la fabricación ha logrado disminuir el coste de los aerogeneradores que se sitúa en torno a los 500 €/kW y 700 €/kW. Los costes totales varían entre las 700 €/kW y las 1.000 €/kW, directamente condicionados al apartado orográfica y accesos del emplazamiento. El coste del kilovatio hora producido se sitúa en entre 0,04-0,08 €/kWh, en zonas de óptimo potencial eólico. En referencia al tamaño de los aerogeneradores se ha incrementado a máquinas de más de 1500 kW y 75 metros de diámetro.

Es muy complicado comparar aeroturbinas de diferentes tamaños, debemos determinar los costes que suponen la instalación de la torre, el equipo de baterías, el regulador de carga, obra civil, transporte, etc. La turbina supone un 15 a un 50% del total invertido en la instalación.

2.2.2. Tecnología Solar Fotovoltaica

2.2.2.1 Introducción

La Energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsada por la necesidad de asumir los retos que en materia de generación de energía se presentan.

Este crecimiento se ha producido gracias a los mecanismos de fomento de algunos países, que, como España, han propiciado un gran incremento de la capacidad global de fabricación, distribución e instalación de esta tecnología.

A finales de 2010, la potencia acumulada en el mundo era de aproximadamente 40.000 MWp según datos de la European Photovoltaic Industry Association (EPIA), de los cuales cerca de 29.000 MWp, un 72%, se localiza en la Unión Europea. Para los próximos años se espera que el continuo crecimiento de la última década a nivel mundial se mantenga.

Las tres áreas de mayor interés en el mundo, según la potencia acumulada, son Europa (destacando Alemania y España, con más de un 52% del total mundial), Japón y EE.UU. Japón con cerca de 3.622 MW acumulados y EE.UU. con aproximadamente 2.727 MW representan el 9% y el 6,80% respectivamente de la potencia total. En el gráfico siguiente se representa el histórico de la potencia acumulada a nivel mundial en los últimos años, apreciándose claramente el crecimiento exponencial.

A corto plazo es previsible que esta distribución del mercado se mantenga, si bien hay países que empiezan a despuntar, lo cual hace suponer también que en el futuro el peso relativo de los países con más potencia no será tan preponderante como en la actualidad.

Así países como Italia, que se convierte en el año 2009 en el segundo mercado mundial, con 711 MW instalados, y en el año 2010 se estiman unos 2.321 MW más.

En Europa la República Checa que instaló en 2009 411 MW y en 2010 aproximadamente unos 1.490 MW, y Bélgica 210 MW en 2010. Japón y Estados Unidos siguen manteniéndose en sus posiciones con 990 MW y 980 MW instalados respectivamente.

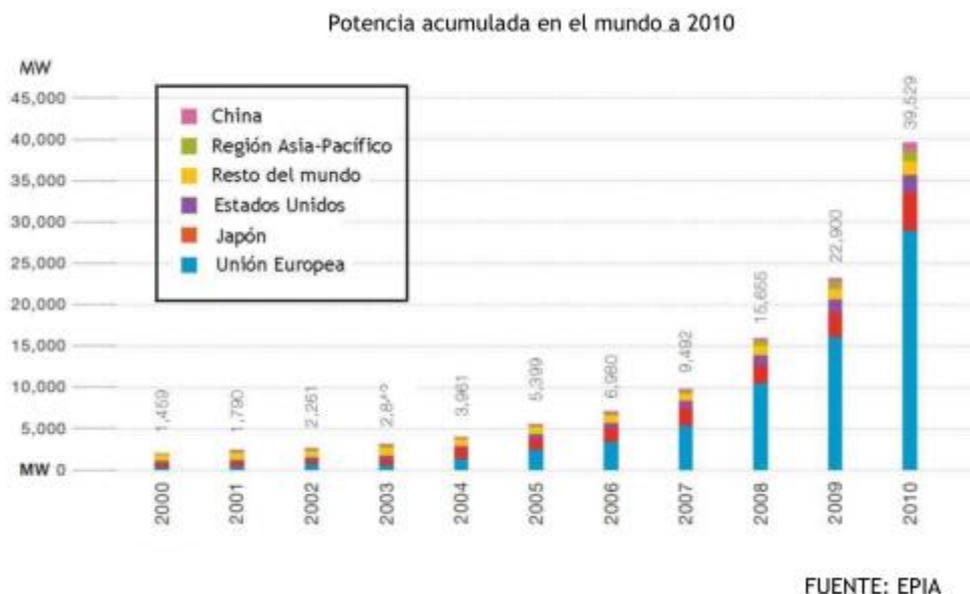


Figura 2.11 Potencia Fotovoltaica acumulada en el Mundo

Los datos más relevantes de la industria solar fotovoltaica en el mundo son:

- Los países principales por potencia instalada en 2010, por orden, fueron: Alemania (7.408 MW), Italia (2.321 MW), República Checa (1.490 MW) Japón (990 MW) y EE.UU. (980 MW).
- La potencia mundial instalada en el año 2010 fue de 16.600 MW, lo que supuso un incremento del 72% de la potencia mundial acumulada con respecto al año 2009.
- El 79% de la potencia mundial instalada en 2010 fue en la Unión Europea, con más de 13.240 MW. Dentro de la Unión Europea el mercado alemán fue claramente el preponderante representando el 59% de todo el mercado europeo.
- Japón ha instalado 990 MW en 2010 llegando a una potencia total instalada de 3,6 GW.
- EE.UU. instaló en 2010 980 MW en 2010, alcanzando aproximadamente los 2,7 GW.
- Italia con una potencia total acumulada de 3,4 GW se convierte en el segundo mercado mundial en el año 2009 y 2010, habiendo instalado 711 MW y 2.321 MW respectivamente.

Aparecen nuevos actores como China con 520 MW acumulados y la India con 30 MW. En 2010 se alcanzó una producción mundial de células fotovoltaicas de 27.213 MW. Los primeros fabricantes de células fotovoltaicas en el mundo han sido Suntech Power (5,8% del mercado mundial), JA Solar (5,4%), First Solar (5,2%), Trina Solar (3,9%), Q-Cells (3,7%), Yingli (3,6%), Motech (3,5%), Sharp (3,3%), Gintech (3,0%) y Kyocera (2,4%).

En el año 2010, aproximadamente el 87 % de las células se fabricaron con silicio, de las cuales con silicio monocristalino el 33,2 %, con policristalino el 52,9 %, y con amorfo el 5%; el 5,3 % con telururo de cadmio, el 1,2 % con cobre, selenio e indio (CIS), y el 2,4 % restante con otras tecnologías, según datos de la revista especializada Photon International.

2.2.2.2. Estado del desarrollo de la energía solar fotovoltaica en Europa.

En Europa, según datos de EurObserv'ER, la potencia instalada ascendía a finales de 2010 a 29.327 MWp, repartidos entre 29.173 MWp de instalaciones conectadas a red y 154 MWp de instalaciones aisladas de la red eléctrica. En la siguiente figura se muestra las potencias

acumulada en 2010 en los principales países de la Unión Europea.

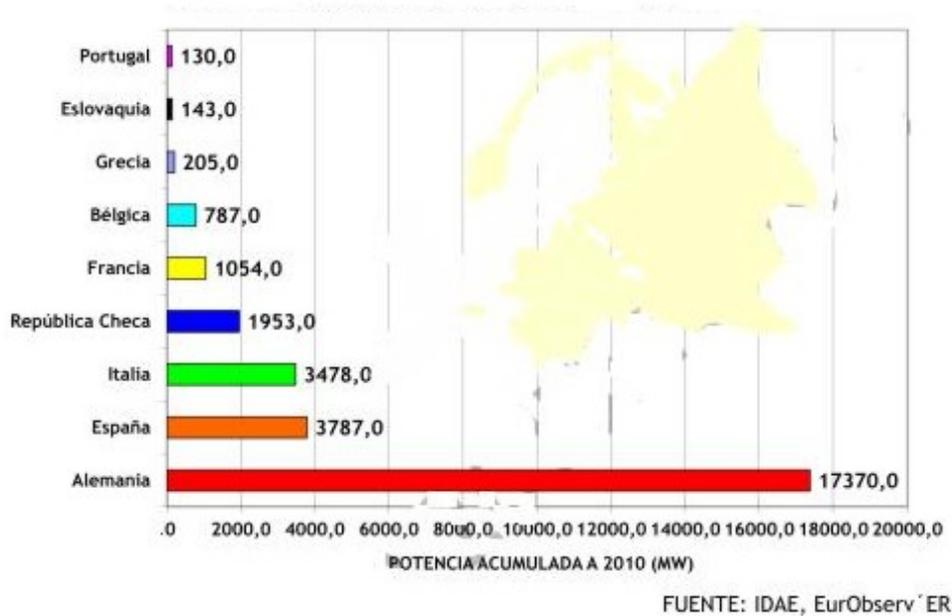


Figura 2.12 Potencias fotovoltaicas acumuladas en la Unión Europea

Alemania es el país de la Unión Europea con mayor potencia fotovoltaica acumulada, con 17.370 MW instalados en 2010. Domina claramente el mercado europeo, representando el 59 % de éste. España, con 3.787 MW acumulados, es el segundo país por potencia acumulada en 2010.

En el año 2008 España fue el primer país por potencia instalada, con 2.705 MW, frente a los 1.809 MW de Alemania, que fue el segundo país del mundo. La potencia instalada en España en 2009 no obtuvo un incremento tan fuerte como en el año anterior debido al cambio de regulación del sector. El cierre de 2010 muestra un incremento con respecto a 2009. No obstante las nuevas modificaciones legales y eliminación de primas prevén una nueva disminución de las instalaciones.

Entre el resto de países destacan Italia, República Checa, Bélgica y Francia, que estudian políticas de desarrollo a semejanza de Alemania y España. Es de destacar en este sentido al gobierno italiano, que mediante la aprobación del Nuevo Conto fija una prima fija adicional al precio de mercado de la energía. Esta prima varía según el nivel de integración de la instalación y es válida durante los 20 primeros años de explotación. El crecimiento del sector fotovoltaico en Italia, por tanto, se asienta bajo las premisas de incentivos y la simplificación de los trámites administrativos.

Italia, con estas políticas, ha alcanzado unos 711 MW instalados en el año 2009 y un total acumulado en el año 2010 de 3.478 MW.

2.2.2.3 .Estado del desarrollo de la energía solar fotovoltaica en España.

El desarrollo de la energía solar fotovoltaica antes del año 2000 era muy escaso, y su venta a la red estaba fomentada mediante primas que cobraban los productores por cada kWh inyectado a la red sobre el precio del mercado. En 2004 esta energía representaba una parte muy pequeña del conjunto de las renovables, que en total suponían aproximadamente el 6,5% del consumo de energía primaria. Desde el año 2000, y con la aprobación del Plan de Fomento de Energías Renovables en 1999, la instalación de placas fotovoltaicas ha ido creciendo un 40% cada año. El objetivo era llegar a los 143.000 kilovatios instalados en 2010, cubriendo al menos el 12% del consumo de energía primaria mediante renovable.

Entre 2004 y 2007, el consumo de energía a partir de renovables se incrementó en un 10% (de 9.152 a 10.228 Ktep). La tendencia y las previsiones son ascendentes, para este año 2012 se prevé que el 12,3% del consumo de energías primarias corresponderá a las renovables. La industria fotovoltaica, aportó un 0,62% del PIB entre 2006 y 2008 y mantuvo 93.000 empleos durante 2009.

Durante el año 2008 España se convirtió en el primer mercado fotovoltaico del mundo, con más de 2.500 MW instalados, superando con ello a Alemania, tradicional líder internacional en implantación de la energía solar. Sin embargo, a diferencia de lo que ha ocurrido en Alemania, el crecimiento en España no se ha producido de un modo sostenible: si el Gobierno quería conectar 371 MW solares a la red en 2010, en la actualidad en España hay casi 10 veces más potencia instalada, puesto que se superan los 3.300 MW. Como resultado, el Gobierno recortó su política de ayudas al aprobar el Real Decreto 1578/2008.

Este recorte llegó a casi paralizar el sector fotovoltaico español a causa de los cambios de regulación: A grandes rasgos, este recorte se ha traducido en paralizar el mercado durante más de seis meses por el cambio regulatorio; reducir la retribución por la energía producida un 30%; introducir una reducción progresiva de la retribución que puede superar el 10% anual; establecer un límite máximo anual de 500 MW durante los próximos años, con un nuevo registro para adjudicar esta potencia que complica la tramitación administrativa de los proyectos; y dividir el mercado en dos segmentos, uno para plantas solares en suelo y otro para instalaciones incorporadas a la edificación, cuando más del 95% del mercado estaba orientado al suelo.

Con respecto a los datos de años anteriores, la Comisión Nacional de Energía refleja que en 2009 se instalaron en España 17 MW fotovoltaicos, a diferencia de 2010, que se instalaron 392

MW (un 2305% más). Este porcentaje tan desorbitado lo que refleja mas bien es el hundimiento durante 2009, no una evolución extraordinaria del mercado en 2010. La realidad es que entre 2009 y 2010 el Gobierno adjudicó 979 MW, de los que no se han instalado ni la mitad.

Debido a la desconfianza generada por las normas retroactivas aprobadas en 2010 y la mala situación financiera, gran parte de la potencia asignada en 2010 no se instaló en 2011. La mala situación financiera se está viendo en que numerosos proyectos inscritos en el Registro de Preasignación de Retribución no están consiguiendo el capital necesario para su ejecución.

Por tanto, ante esta situación lo que están haciendo las empresas del Sector Fotovoltaico nacional es intensificar la salida hacia otros mercados exteriores para desarrollar su actividad, ya que la situación en España no se corresponde con lo que sucede más allá de nuestras fronteras.

De las últimas legislaciones divulgadas al respecto es el Real Decreto 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia (inferiores a 10 kW), y el Proyecto de Real Decreto por el que se establece la regulación del Autoconsumo fotovoltaico o Balance Neto en España. El decreto publicado regula la venta de energía al conectar las pequeñas instalaciones fotovoltaicas a la red, y el no publicado regulará la contratación de un nuevo suministro para autoconsumo, un contrato derivado de esta nueva situación de conexión a la red.

Es precisamente ese decreto aun no publicado el que suscita más interés, según el cual a empresa comercializadora establecerá un nuevo tipo de contrato, denominado consumo de balance neto. En el que los excedentes de la instalación fotovoltaica quedarán “almacenados” en la red. Consumir la energía almacenada tendrá coste cero, en caso de energía faltante el precio será el acordado entre productor y consumidor. No habrá restricciones de quién pueda contratar el consumo con balance neto, lo que ayudará a que el mercado de baja tensión pueda ser muy competitivo.

En Enero de 2012 el Gobierno aprobó el RDL 1/2012 por el que se procede a la suspensión de los procedimientos de pre asignación de retribución y a la suspensión de los incentivos económicos para nuevas instalaciones fotovoltaicas y demás fuentes renovables. En la práctica tal RDL supone que las nuevas plantas fotovoltaicas que no estén inscritas en cupos no recibirán prima alguna pero podrán vender la energía a precio de mercado.

La potencia fotovoltaica total conectada a red en España a Marzo de 2012 es de 4.243 MW, con un total de 57.718 instalaciones fotovoltaicas inscritas en el Registro de Instalaciones de Producción en Régimen Especial.

2.2.2.4 Islas Canarias

Con relación a la energía de origen fotovoltaico, el Plan Energético de Canarias (PECAN), sólo recoge la previsión de la potencia instalada en Canarias por islas a lo largo de todo el horizonte temporal del Plan.

En el gráfico siguiente se muestra dicha previsión, así como su evolución real hasta el 2010 y las nuevas previsiones hasta el 2015.

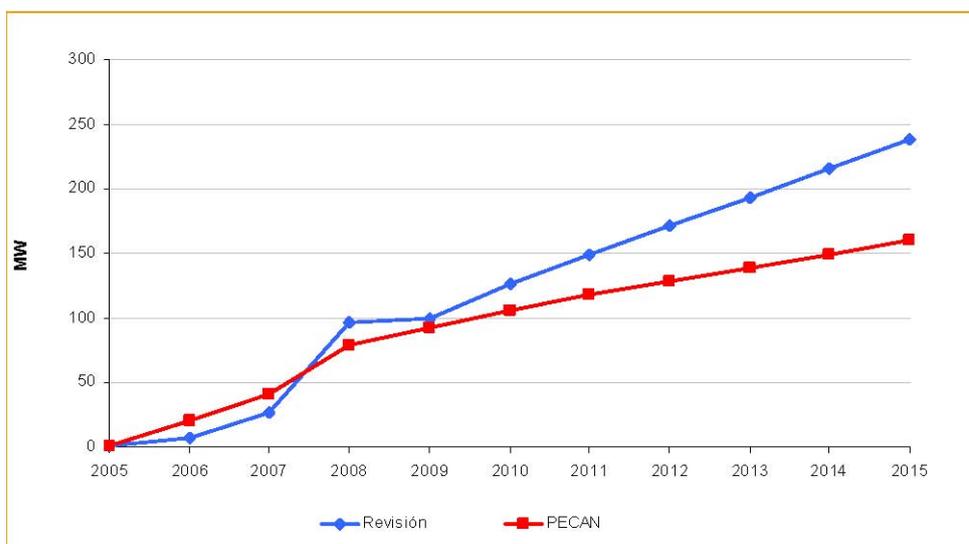


Figura 2.13 Evolución de la energía Fotovoltaica en Canarias (GobCan 2012)

El boom experimentado por la fotovoltaica en los últimos años ha tenido como consecuencia una evolución de la potencia instalada para el conjunto de Canarias por encima de las previsiones del PECAN, pasando de crecimientos negativos cercanos al 50% en 2005, a crecimientos positivos del 20% en 2008 y de casi el 8% en 2009, respecto de las previsiones iniciales para esos años.

Si se analiza esta evolución por islas, se comprueba que Tenerife es la que más ha contribuido a este avance, en donde la potencia instalada pasó de estar en 2005 un 91% por debajo de los objetivos de PECAN-2006, a estar un 92% por encima de dichas previsiones en 2009. Por su parte, la evolución de la potencia instalada en Gran Canaria se ajusta más a la inicialmente esperada, pasando de estar en 2005 un 19% por debajo de las previsiones, a un 12% por encima de los objetivos iniciales en 2008, situándose en 2009 en niveles similares a los previstos. En el resto de islas los crecimientos han estado muy por debajo de lo esperado.

Sin embargo, el nuevo marco retributivo establecido tras la publicación del Real Decreto 1578/2008, podría suponer el estancamiento a la inversión privada en esta tecnología. Por ello, en las nuevas previsiones sólo se ha tenido en cuenta las instalaciones que a finales de 2010 contaban con autorización administrativa, pendientes de ejecución, y que suponen un total para

Canarias de 111 MW adicionales (35 MW en Gran Canaria; 2,4 MW en Lanzarote; 4,3 MW en Fuerteventura; 65,6 MW en Tenerife y 4,1 MW en La Palma). En el caso de La Gomera y El Hierro únicamente se ha previsto un crecimiento mínimo en lo que resta de horizonte de planificación, similar al registrado en los últimos años en esas islas (0,02 MW adicionales en cada isla).

Con todo ello, las nuevas previsiones para el conjunto de Canarias son claramente superiores a las iniciales (casi un 50% por encima en 2015), estimándose una potencia total instalada en Canarias de 238 MW al final del horizonte temporal del PECAN, frente a los 160 MW inicialmente previstos.

La isla de Tenerife es la que más seguirá contribuyendo a este avance, estimándose una potencia instalada un 165% superior a la prevista en el PECAN en el año 2015. Asimismo, en Gran Canaria y en La Palma las nuevas previsiones son también superiores a las antiguas (un 34% y un 59% superior en 2015, respectivamente). Sin embargo, en el resto de islas las nuevas previsiones estiman unas potencias instaladas muy inferiores a las previstas en PECAN-2006.

2.2.2.5. Caracterización de la energía solar.

La energía solar fotovoltaica es aquella que se obtiene por medio de la transformación directa del sol en energía eléctrica.

Esta transformación se realiza mediante, entre otros métodos, con los paneles fotovoltaicos (PV). Los PV consisten en materiales semiconductores que absorben la luz. La energía solar produce la excitación del electrón, que provoca la separación de este de su átomo, permitiendo le pasar por el material para producir electricidad.

2.2.2.6. Estructura básica de una célula solar. Módulo fotovoltaico.

Un semiconductor con una estructura p-n hace posible la circulación de la corriente eléctrica gracias a la presencia de un campo eléctrico.

En el caso del material semiconductor silicio la región tipo n se impurifica con fósforo, que tiene cinco electrones de valencia, uno más que el silicio, y es una región con una concentración de electrones mayor que la de huecos. La región tipo p se impurifica con boro, que tiene tres electrones de valencia y por tanto una región con una concentración de huecos mayor que la de electrones.

El otro concepto importante en la estructura de una célula solar es la malla de metalización frontal, los contactos metálicos que se han de realizar para extraer la corriente eléctrica de la célula. La célula debe absorber la luz. En consecuencia el lado de ésta que queda directamente expuesto al sol, no puede recubrir totalmente la superficie de la célula. El porcentaje de superficie que recubre se denomina factor de recubrimiento o de sombra, F_s . Por el contrario el contacto eléctrico sobre la cara no eliminada cubre toda el área.

1. Capa anti-reflexión.
2. Superficie de contacto de la cara posterior (electrodo positivo).
3. Rejilla de contacto de la cara anterior (electrodo negativo).
4. Base, silicio con carga positiva.
5. Emisor, silicio con carga negativa.
6. Zona de carga espacial.
7. 7 Capa intermedia.

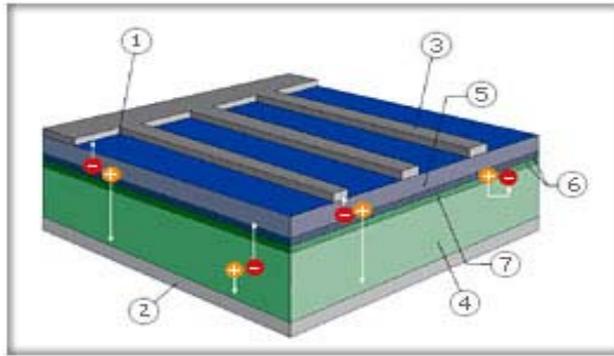


Figura 2.14. Estructura de una célula convencional.

Las células se montan en serie sobre paneles o módulos solares para conseguir un voltaje adecuado. Parte de la radiación incidente se pierde por reflexión y otra parte por transmisión. El resto es capaz de hacer saltar electrones de una capa a la otra creando una corriente proporcional a la radiación incidente. La capa antirreflejo aumenta la eficacia de la célula. Para su empleo práctico, las células solares se asocian eléctricamente en diferentes combinaciones que permiten obtener los valores de corriente y voltaje necesarios para una aplicación determinada y se encapsulan entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie. El conjunto de células, conexiones, protecciones, soportes, etc., constituyen lo que llamaremos el generador fotovoltaico.

Módulo fotovoltaico.

Las células se expiden al mercado en grupos de ellas, asociadas eléctricamente entre sí y encapsuladas en un único bloque llamado panel o módulo fotovoltaico, y que constituye el elemento básico con el que se construyen los generadores fotovoltaicos (Carta et al,2009).



Figura 2.15. Módulo fotovoltaico.

El módulo fotovoltaico proporciona los niveles de voltaje y corrientes adecuados a cada aplicación, protege a las células frente a las agresiones de los agentes de la intemperie, las aísla eléctricamente del exterior y, por último, de rigidez mecánica al conjunto. Otras características de interés son la facilidad de instalación, la limpieza, la disipación de calor de las células, el tiempo de vida y el bajo coste.

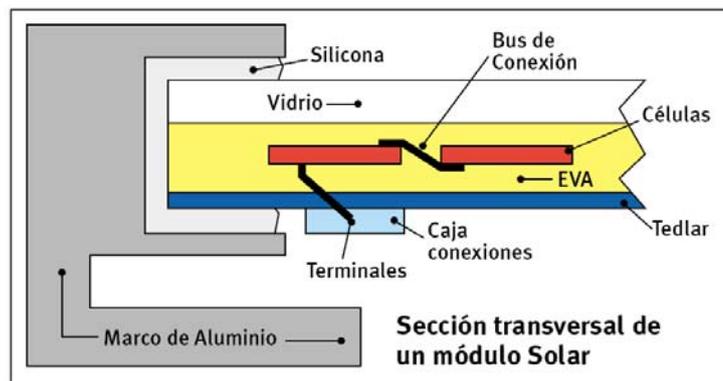


Figura 2.16 Corte transversal de un panel fotovoltaico.

2.2.2.7. Tecnologías Disponibles

Dentro de la energía solar fotovoltaica generalmente se acepta como método de clasificación de las diferentes tecnologías que se utilizan el de los materiales que en la célula solar realiza la conversión energía solar/ energía eléctrica.

La tecnología más extendida es la del silicio monocristalino, X-Si, seguida por la del silicio policristalino, p-Si, el silicio amorfo, a- Si, las células de alto rendimiento, generalmente GaAs o compuestos relacionados InP, InAs, TeCd, CIS, etc. Finalmente se presentan las células multiunión y las células bifaciales.

- **Células de silicio monocristalino**

Las células de silicio monocristalino son las células a las que habitualmente nos referimos como células de silicio. Como su nombre indica, todo el volumen de la célula es un único cristal de silicio. Es el tipo de células cuya utilización comercial está más ampliamente extendida hoy en día. Las eficiencias límites par este tipo de células, a nivel de producción industrial se sitúan entorno 17%.

- **Células de silicio multicristalino.**

La utilización de células de silicio multicristalino constituye una estrategia de abaratamiento de costes mediante reducción del coste de las obleas de partida con las que se fabrica las células. El silicio multicristalino no es más que silicio constituido por trozos de silicio cristalino. La frontera entre los granos de silicio multicristalino constituye una fuente adicional de recombinación por lo que es de esperar que la eficiencia de estas células sea inferior que las homologas monocristalinas.

Se entiende como células de lámina delgada aquellas en que el espesor es de entre las décimas y varias micras.

El desarrollo de los materiales multicristalino en lámina delgada y su aplicación en dispositivos fotovoltaicos está claramente dirigido a la reducción de los costes de producción, estos materiales son el silicio amorfo(a-Si), el silicio multicristalino de lámina delgada, el telurio de cadmio (CdTe), el seleniuro de cobre e indio (CuInSe_2) y el arseniuro de galio (AsGa), y el CIS.

▪ **Células de silicio amorfo.**

El silicio amorfo carece del ordenamiento de los átomos de silicio en forma de red cristalina. Por lo que no cabría esperar de este material ninguna propiedad semiconductor. Sin embargo lleva incorporado una cierta cantidad de hidrogeno (a-Si:H). El hidrógeno tiende a incorporarse a aquellos enlaces de silicio que quedan libres y que son los principales responsables de las malas propiedades, disminuyendo su influencia, hasta el punto que el material resulta factible para fabricar células con una eficiencia entorno al 10%.

Comparado con el material cristalino, el silicio amorfo es mucho más absorbente siendo necesarios espesores inferiores a la micra para absorber la mayor parte de la luz solar.

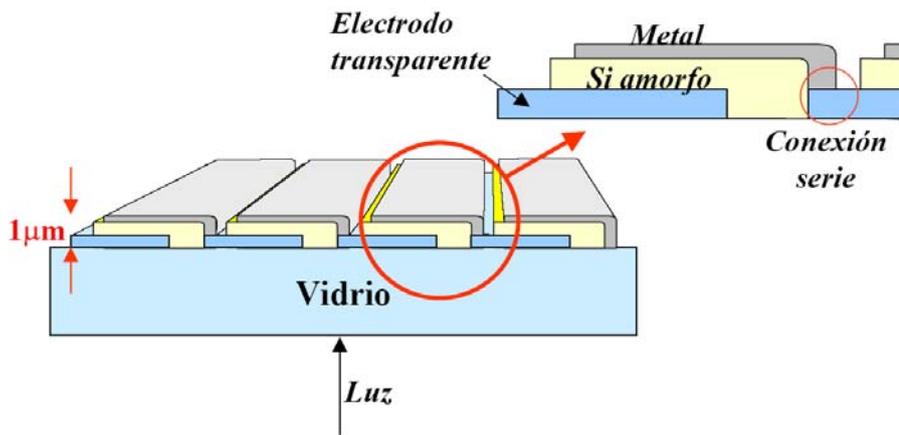


Figura 2.7. Célula de silicio amorfo.

▪ **Células de arseniuro de galio y semiconductores III-V**

El GaAs es un material muy absorbente. Bastan unas pocas micras de material para absorber toda la luz incidente. Las capas fotovoltaicamente activas en esta célula están situadas en la parte superior del sustrato sobre el que han sido crecidas, el cual, simplemente desempeña un papel de soporte mecánico. Dado su elevado coste se investigan en el contexto de su utilización en sistemas de concentración y se utilizan para aplicaciones espaciales.

Las células de InP se utilizan en aplicaciones espaciales, por su resistencia a la radiación. Pero en la tierra han sido desechadas debido a su alto coste.

- **Células de telururo de cadmio**

El telururo de cadmio tiene un “gap” de 1,4 eV (energía de separación entre las bandas de conducción). Este valor se corresponde con el valor teórico óptimo para el aprovechamiento del espectro solar. Se han conseguido eficiencias superiores al 15%.

- **Células de seleniuro de cobre e indio**

La utilización de monocristalina no es útil, para su aplicación práctica, por lo que una vez demostrada la validez del material comenzó el desarrollo de dispositivos CIS en lámina delgada.

Las características de la mayoría de los dispositivos de CuInSe_2 , con eficiencias superiores al 10% son el haber sido fabricadas con una disposición donde el CIS es depositado sobre un vidrio o alúmina recubierto de una capa metálica de Mo, y de poseer una capa ventana compuesta generalmente por sulfuro de cadmio, CdS, o sulfuro de cadmio y zinc, $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$, en combinación con un óxido conductor transparente. Habiendo sido preparadas la mayor parte de estas células por evaporación térmica o por selenización de aleaciones de cobre indio o de los precursores binarios, In_xSe_y , Cu_xSe ,...

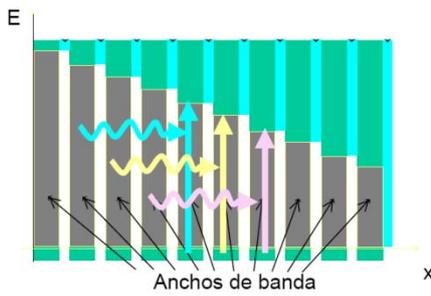
- **Células multiunión**

En las células basadas en un solo gap, no pueden absorberse los fotones cuya energía es menor que el valor de este gap y, por tanto se pierden. Las células multiunión constituyen una estrategia para aprovechar estos fotones.

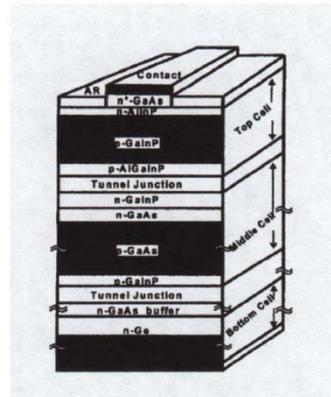
Existen dos tipos de configuraciones para los sistemas multigap:

- a. Sistemas apilados: las células se sitúan una detrás de otras en orden decreciente de su gap. El apilamiento es monolítico cuando las células se fabrican en la misma oblea y mecánico, cuando las células se fabrican por separado y después se unen, por ejemplo utilizando un adhesivo especial.
- b. Sistemas de desdoblamiento espectral: la luz procedente del sol se separa en diferentes componentes espectrales y se distribuye hacia las células por medio de una serie de filtros.

• Células tándem



Límite teórico: $\eta=86,3\%$



Tres uniones
 $\eta=32,2\%$

Figura 2.18. Células multiunión.

▪ Células bifaciales.

Son células con dos caras habilitadas para la transformación de energía. Tienen grandes ventajas en dispositivos de concentración.

2.2.2.8. Descripción general de un sistema fotovoltaico. Aplicaciones.

Se define el sistema fotovoltaico como un conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren a captar y transformar la energía solar disponible, transformándola en utilizable como energía eléctrica.

Los principales elementos que constituyen un sistema fotovoltaico son:

- Generador fotovoltaico
- Regulador de carga
- Sistema de acumulación
- Inversor
- Carga

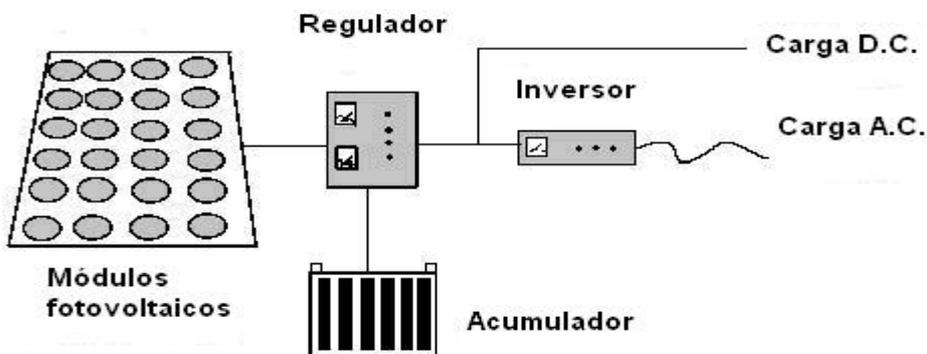


Figura 2.19. Sistema fotovoltaico.

Generador fotovoltaico:

Transforma la energía del sol en energía eléctrica y carga las baterías.

Regulador de carga:

Controla la carga de la batería evitando que se produzcan sobrecargas o descargas excesivas, que disminuyen la vida útil del acumulador.

Un problema importante que es fundamental para el correcto funcionamiento de todo el sistema, que es la protección de la batería de procesos inadecuados de carga y descarga, que se hace mediante un regulador o controlador de carga. Este dispositivo electrónico, controla tanto el flujo de la corriente de carga desde los módulos hacia la batería, como el de descarga que va desde la batería hacia el consumo. Cuando la batería está cargada, el regulador interrumpe el paso, y cuando se alcanza el nivel mínimo de descarga, este interrumpe el paso hacia el consumo.

Puede incorporar un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia, que es un dispositivo que aumenta el rendimiento de la instalación.

Sistema de acumulación. Baterías:

Acumulan la energía entregada por los paneles.

Cuando hay consumo, la electricidad la proporciona directamente la batería y no los paneles. Las baterías para aplicaciones fotovoltaicas están construidas especialmente para trabajar con ciclos de carga/ descarga lentos. La vida útil de una batería se encuentra entre 3 y 5 años, pero depende del correcto uso que hagamos de ella y el mantenimiento, que en algunas no se hace necesario, pero sin en otras, como puede ser la adición de agua destilada o electrolito.

Inversor:

La corriente que entrega la batería es corriente continua y la mayoría de los electrodomésticos que se comercializan funcionan con corriente alterna. Por este motivo se utilizan inversores que convierten la corriente continua en alterna, desde los módulos que proveen corriente directa a 12 o 24 Voltios, a corriente alterna a 120 V.

El inversor realiza las siguientes funciones:

- Transformar la corriente continua en alterna.
- Conseguir el mayor rendimiento del campo fotovoltaico.
- Realizar el acoplamiento a la red.
- Protecciones.

Carga:

Por último, en los componentes del sistema, tenemos los aparatos eléctricos que van a consumir la corriente generada o almacenada, como pueden ser: paneles de control, pequeñas bombas dosificadores, etc., y la bomba de alta presión.

La selección de estas cargas es tan importante como el resto de los equipos fotovoltaicos, y para esto hay que tener en cuenta los siguientes aspectos, que el consumo diario no debe sobrepasar la cantidad de energía diaria producida por el sistema fotovoltaico, y tener en cuenta el tipo de energía que necesitan los aparatos eléctricos que se van a utilizar con el fin de determinar si se necesita un inversor o no. Es recomendable el uso de aparatos modernos de bajo consumo energético y alta eficiencia.

Para dimensionar la instalación, tendremos que tener en cuenta que la suma instantánea de las potencias individuales no debe ser mayor que la capacidad máxima en vatios (W) del inversor.

2.2.2.9. Sistema conectado a red

Un sistema fotovoltaico de conexión a red es un tipo de instalación en la que intervienen tres elementos: los módulos fotovoltaicos, el inversor y la línea eléctrica. En este tipo de sistemas, la energía generada por los módulos fotovoltaicos pasa directamente a un inversor DC/AC que convierte la tensión continua en alterna, inyectando la energía producida en la red eléctrica.

Los sistemas fotovoltaicos conectados a la línea eléctrica, han sido objeto de un interés creciente durante los últimos años en todos los países industrializados, como una potencial tecnología capaz de expandir el mercado fotovoltaico a núcleos electrificados, sacando de esta forma al sector de su típico encasillamiento de tecnología válida exclusivamente para instalaciones autónomas.

Cabe señalar que las instalaciones llave en mano se perfilan como la forma más cómoda, eficaz y barata a corto plazo de integrar sistemas fotovoltaicos conexiónados con la red.

Dentro de las instalaciones conectadas a la red pueden encontrarse dos casos:

- Centrales fotoeléctricas, también denominadas centrales de potencia
- Sistemas fotovoltaicos en edificios

El modo de funcionamiento de ambos tipos de instalaciones es el mismo, y las únicas diferencias que pueden darse son el tamaño de la instalación, el soporte de la instalación, el soporte del campo colector y la proporción de energía entregada a la red con respecto a la energía total producida.

Actualmente sólo un porcentaje muy pequeño de la electricidad se utiliza en instalaciones aisladas de las redes eléctricas, por lo que las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red están llamadas a representar un importante papel en el conjunto del mercado fotovoltaico en un plazo más o menos breve.

Uno de los factores favorables de la energía fotovoltaica en conexión a la red es la posibilidad de generación de ramificaciones terminales de la red de distribución, mejorando así la calidad del servicio y cubriendo servicios mínimos en caso de fallo de la red.

Adicionalmente, la energía producida es máxima en las horas pico (esto es especialmente cierto en los meses de verano, cuando en las horas de mayor insolación funcionan los equipos de aire acondicionado a máxima potencia), que es cuando más problemas de suministro tienen las compañías eléctricas y el coste de generación es mayor.

Las instalaciones conectadas a la red se diferencian básicamente de las aplicaciones aisladas por la ausencia de elementos de acumulación de la energía producida, ya que es posible utilizar la energía procedente de la red para suplir la demanda no cubierta por la instalación fotovoltaica.

2.2.2.10. Sistemas aislados

La principal aplicación de los sistemas fotovoltaicos autónomos está en la electrificación doméstica, aspecto que se comentará a continuación.

La electrificación doméstica sigue siendo una de las aplicaciones más importantes de la energía solar fotovoltaica. En relación con los elementos de consumo, se presentan ciertas peculiaridades que se destacan a continuación. En cuanto a los criterios generales de diseño del generador, también existen condiciones específicas para este tipo de aplicación. Estos criterios adquieren especial relieve en la decisión sobre el tipo de instalación a realizar, dependiendo de las condiciones particulares de cada caso (centralizada o descentralizada), relacionadas, además, con el tipo y características de la corriente a utilizar, así como las propias prestaciones de la instalación.

Debe tenerse siempre en cuenta que la instalación fotovoltaica es un elemento más de la vivienda, por lo que los ocupantes deben ser conscientes, en todo momento, de las posibles limitaciones que existen en las disponibilidades de energía, así como de los principios de funcionamiento de la misma, con el fin de prevenir problemas de suministro o daños a los distintos elementos que componen la instalación. Para el caso de que los usuarios de la instalación no sean habituales (visitantes ocasionales, casas de campo arrendadas, usuarios de turismo rural...) es necesario recordarles que la energía disponible no es ilimitada.

2.2.2.11. Costes

Los costos totales de un sistema fotovoltaico no solo incluyen el costo de inversión, también hay que incluir los costos de mantenimiento, y de reemplazo, especialmente de las baterías.

Según el informe de Asif del 2004, La Asociación de la Industria Fotovoltaica, para instalaciones conectadas a red estándar el precio del sistema excluyendo el IVA, es el siguiente:

(en EUROS/Wp)	3 kWp	30 kWp	300 kWp	3 MWp
Paneles	3,26	3,19	2,82	2,75
Estructura soporte	0,36	0,38	0,31	0,25
Inversor+protecc.+contador, monit.	0,90	0,70	0,50	0,34
Cableado y varios	0,20	0,17	0,13	0,11
Montaje y p.e.m.	0,44	0,40	0,26	0,16
Ingeniería, gastos generales admon. etc., t B° industr.	1,93	1,86	1,59	1,27
Total en EUR/Wp	7,1	6,7	5,6	4,9

Tabla 2.5.- Coste sistema fotovoltaico en €/Wp. (ASIF)

En porcentaje respecto al monto total de la instalación:

	3 kWp	30 kWp	300 kWp	3 MWp
Paneles	45,8%	47,6%	50,3%	56,4%
Estructura soporte	5,3%	5,7%	5,6%	5,1%
Inversor+protecc.+contador, monit.	12,6%	10,4%	9,0%	6,9%
Cableado y varios	2,8%	2,6%	2,2%	2,2%
Montaje y p.e.m.	6,2%	6,0%	4,6%	3,3%
Ingeniería, gastos generales admon. etc., t B° industr.	27,1%	27,7%	28,4%	26,2%
Total en EUR/Wp	100%	100%	100%	100%

Tabla 2.6.- % Coste sistema fotovoltaico. (ASIF)

2.2.3 Tecnología de desalinización.

2.2.3.1 Introducción a los sistemas de desalinización.

Cuando en determinadas zonas geográficas se produce una situación de escasez de recursos hidráulicos convencionales, se requiere la adopción de ciertas medidas para cubrir las necesidades de la población, del sector industrial o del agrícola (Clarke, 1993; Gleick, 1993; Gleick, 2000; Cosgrove y Rijsberman, 2000; Petrella, 2001). Esta escasez de recursos puede ser debida a la falta de lluvias (el ciclo del agua, y la lluvia como forma principal de aportación de caudales), o bien a circunstancias como puede ser una alta presión demográfica en una zona.

Tradicionalmente entendemos por recursos hidráulicos convencionales los de origen natural, es decir las aguas superficiales o subterráneas. Desde hace años, sin embargo, han ido apareciendo tecnologías que permiten el acceso a otros recursos. La producción industrial de

agua por desalación, o la reutilización de aguas residuales depuradas, como forma de aportar nuevos caudales al ciclo de uso, ya no pueden seguirse llamando “no convencionales”, puesto que en algunas zonas están totalmente introducidas y forman parte de la planificación hidrológica, además de estar asimiladas en el paisaje. Ya son recursos tan convencionales como los demás.

Eso si, son tecnologías más sofisticadas que las tradicionales, y más caras. Son intensivas en energía, requieren fuertes inversiones y una atención permanente, así como consumo de productos químicos. Además de la desalación y reutilización. Piénsese por ejemplo en las técnicas de transporte de agua hacia las islas, o las propuestas, hasta ahora inviables, de transporte de masas de hielo polar hasta zonas áridas de la Tierra.

A pesar de la carestía, en algunas zonas en que el balance hidrológico está sensiblemente desequilibrado, la necesidad de la utilización de estas tecnologías es indiscutible.

La *desalación* es el proceso de separación de minerales disueltos (sales) de aguas salobres o de mar para convertirlas en aguas adecuadas para consumo humano, uso industrial o riegos. La necesidad de utilización de los procesos de desalación ha ido creciendo a medida que en algunas zonas del mundo se han hecho insuficientes los suministros fiables de agua dulce.

La limitación de los recursos disponibles plantea un amplio debate en el que destacan dos cuestiones: la reestructuración del regadío tradicional, en el que se infrutiliza este recurso primario y escaso dada la baja eficiencia global del mismo, y la búsqueda de soluciones a la actual escasez de agua.

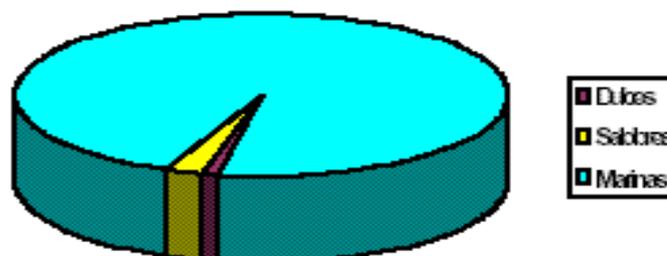


Figura 2.20. Distribución del agua en la superficie de la Tierra

Por todas estas razones, la desalación de aguas salobres o incluso de mar despierta gran interés, si consideramos que aproximadamente más del 97% del agua existente en la superficie de la Tierra presenta estas características (Figura 2.20) El desarrollo al que ha llegado la tecnología de desalación permite, actualmente, la producción masiva de agua a coste moderado, aportando soluciones flexibles y adaptadas a cada tipo de necesidad.

2.2.3.2. Desarrollo Histórico de la Desalación

Aunque el término desalación es de uso reciente, el proceso es conocido desde la antigüedad. El procedimiento más simple, utilizado ya desde la antigüedad, consiste en utilizar “evaporadores” los cuales, aprovechando la energía solar, evaporan el agua contenida en cajas

cubiertas de vidrio o plástico que se condensa en la superficie de éste, resbala y se recoge en un pequeño canalón. Este sistema, utilizado a gran escala en zonas áridas o con escasez de agua, cercanas al mar y con buenas condiciones de insolación, presta grandes servicios cuando las necesidades son limitadas. La utilización de energía solar gratuita supone una enorme ventaja, pero este tipo de desalinización puede producir, según los expertos, poco menos de medio litro de agua dulce por metro cuadrado de superficie y en climas cálidos y poco nubosos.

Ya Aristóteles, 400 años a. c., puso en marcha un evaporador para dar de beber a los marineros griegos. Este método era muy rudimentario, pues estaba orientado a producciones muy pequeñas y se utilizaba en condiciones de extrema necesidad, cuando no había otra alternativa.

Fue a partir de la segunda mitad del siglo XIX cuando comienza a desarrollarse un creciente interés por la calidad del agua y en consecuencia por las técnicas de desalinización debido al desarrollo de la máquina de vapor. Los continuos avances en termodinámica, en química, en mecánica y en ingeniería ayudaron a este desarrollo, permitiendo obtener equipos capaces de mayores prestaciones. En este sentido, la primera patente para desalar agua fue registrada en 1869 en Gran Bretaña, y la primera planta de desalación fue puesta en marcha el mismo año en Adén.

Ya en nuestro siglo, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, se había desarrollado una nueva técnica desalinizadora, basada en la utilización de resinas intercambiadoras de iones. Durante los años 50 se experimentaron grandes avances en el campo de la desalinización mediante cambio de fase, y a partir de esta época se construyeron gran parte de las instalaciones que actualmente existen según las técnicas de: evaporación súbita de múltiple etapa ESME (también llamada Destilación Flahs multietapa, MSF), evaporación múltiples efectos EME (Destilación multiefecto MED), y compresión de vapor, CV.

Las investigaciones no han cesado en este campo; así a finales de la década de los sesenta se logró obtener la primera membrana sintética semipermeable a escala industrial y comienza a desarrollarse la técnica de desalinización por ósmosis inversa (OI).

A partir de este momento la velocidad, tanto de expansión como de desarrollo, de esta técnica ha sido vertiginosa.

Paralelamente se ha ido desarrollando otra técnica de separación por membrana que se basa en la aplicación de un campo eléctrico: la electrodiálisis (ED).

A finales de la década de los 70, el gobierno Estadounidense se percató de la necesidad de construir plantas que pudieran potabilizar cualquier tipo de agua de charco, o de mar disponible durante esfuerzos bélicos, incluso aquellas contaminadas con elementos radioactivos, o con toxinas y gérmenes. El gobierno condujo pruebas de laboratorio y en el campo con todo tipo de agua superficial contaminada. Se probaron varios tipos de membrana de fibra hueca delgada y muchos tipos de membranas espiral. Al final de las pruebas surgió la membrana espiral modelo 1501 TFC como la única y exclusiva membrana aprobada por el ejército. Durante las pruebas

se comprobó que esta es la única lo suficientemente ruda como para potabilizar todo tipo de aguas: saladas, salobres, fangosas y de pantanos.

Estos elementos con la membrana tipo TFC han probado su durabilidad en la planta de Jeddha, construida en 1977 por la Fluid Systems utilizando la membrana 1501. Esta planta al construirse, se convirtió en la planta de desalar agua de mar por ósmosis inversa, más grande del mundo, con una capacidad de más de 12.000 m³/día. Esta ya no es la más grande, pero sigue operando hoy exitosamente, y siendo aún de las pioneras.

A finales de 1991 la capacidad mundial instalada de desalación era de 1.58 millones de m³/día, repartidos en 8.886 plantas, de acuerdo con el informe 1992 IDA Worldwide Desalting Plants Inventory de la Asociación Internacional de Desalación (IDA).

En los últimos años se han promovido grandes proyectos, elevando el número de plantas a 9.900 a finales de 1993 y la capacidad instalada a 19 millones m³/día. El crecimiento de la capacidad instalada es exponencial, pasando de 1 millón de m³/día en 1969 a 9 millones de m³/día en 1982 y al doble diez años después. Hay que señalar, sin embargo, que estas cifras engloban, junto a la desalación de agua de mar, la desalación de aguas salobres y de ríos. En torno al 60% de la capacidad citada corresponde al tratamiento de agua de mar.

La mayor capacidad de desalación instalada se encuentra en el área de Oriente Medio; Arabia Saudí, Emiratos Arabes Unidos y Kuwait. En España, las primeras plantas de desalación de agua de mar (1966) aparecen en Ceuta y Alcadia con capacidad de 4.000 y 143 m³/día respectivamente. En la década de los setenta comienza a instalarse plantas en las Islas Canarias, continuando con un crecimiento regular de las capacidades instaladas a lo largo de los ochenta y con una importante aceleración en los noventa en los que aparecen las plantas de mayor tamaño propiedad de las municipalidades.

2.2.3.3. Historia de la Desalación en Canarias

En los últimos cincuenta años se han perforado más del 50% de los pozos y las galerías, construyendo nuestro pueblo más de dos mil kilómetros de galerías y más de cuatrocientos de pozos. Sólo con la perforación de las galerías y las instalaciones de bombeo, unido al coste de perforación de los pozos, alcanzan un valor total actualizado superior a los 21.382.327,8 mil millones de euros. El subsuelo tampoco admite el ritmo de obras de los últimos cincuenta años, con serios problemas de sobreexplotación en muchos casos. Por ello, la alternativa está en administrar bien nuestros recursos y planificar las prioridades de uso, pues los más de trescientos millones de m³ de agua que producen las galerías y pozos sufren un importante deterioro en cantidad y calidad. El aprovechamiento de aguas de escorrentía tiene también serias dificultades: las presas construidas en el archipiélago, con una capacidad de algo más de 130 Hm³, tienen claras limitaciones, con sólo un 10 ó 15% de capacidad efectiva.

La entrada en crisis de los recursos convencionales embalses, galerías y los pozos (ahora los acuíferos superan en muchos casos los 30 metros de profundidad dejándolos fuera del alcance

de los aeromotores) ha permitido que las desaladoras sean la única alternativa para el suministro de agua a la población.

La primera noticia de experiencia de planta desaladora en Canarias proviene de la isla de Lanzarote en el año 1964. Construyeron una unidad de evaporación súbita multietapa de 2.300 m³/día. Por aquellos años la escasez de agua en la ciudad de Las Palmas de Gran Canaria era preocupante, y en 1964 el Ministerio de Obras Públicas abrió un concurso y adjudicó la construcción y montaje de la planta desaladora Las Palmas I, que entró en servicio en el año 1969, por un importe de 4.207.084,7 millones de euros. Esta planta, también de evaporación súbita multietapa y con una producción de 20.000 m³/día en cuatro evaporadores fue en su momento una de las más grandes del mundo. Diseñada de forma que pudiese producir simultáneamente agua y energía eléctrica, para lo cual dispone de los correspondientes equipos (calderas, turbinas, alternadores, etc.) que le permiten producir 20 Megawattios (MW) de electricidad además del agua. Esta instalación ha venido prestando servicio hasta estas fechas, en que está en vías de una renovación completa.

En el archipiélago disponemos de algo más de 100 desaladoras, en su mayoría construidas con recursos públicos. Sólo la inversión pública supera los 1.200 millones de euros. La inversión en instalación de desaladoras para la producción de un m³ diario ha pasado de costar más de 1800 euros a poco más de 6000. en la actualidad. Por otra parte, los gastos de personal y mantenimiento son similares para plantas de 500 m³/día o de 5.000 m³/día. En la actualidad se están desalando en el archipiélago más de 40 Hm³/año, lo que supone el tercer aporte del líquido elemento en importancia tras las galerías y los pozos.

En la actualidad, la desalación de aguas en Canarias va más allá de unas determinadas técnicas de tratamiento de agua. La tecnología de la desalación ha supuesto en los últimos treinta años un factor de supervivencia para muchas comunidades de población de las islas. Lanzarote y Fuerteventura dependen casi en su totalidad del suministro de agua producida mediante desalación. Las zonas costeras de Gran Canaria, donde habita gran mayoría de la población, también se suministran mediante desalación.

En Canarias las desalaciones se producen mayoritariamente por los siguientes sistemas:

Ósmosis inversa:

Cuya característica principal es la utilización de membranas para el filtrado de elementos salinos y obtención de agua con un sistema más económico.

Sistema de destilación:

Se obtiene agua de gran calidad; el principal problema que plantea es un mayor consumo energético y su instalación es más costosa. Es el sistema ideal para aguas que se reutilicen para la agricultura, ya que las aguas desaladas por ósmosis inversa alcanzan niveles de sales que las hacen no aceptables para la agricultura, teniendo que recurrir a un segundo filtrado.

Electrodiálisis:

Proceso que utilizando membranas semipermeables, intercambiadoras de iones, permite separar los iones del agua. Es un proceso altamente competitivo para aguas con una salinidad inferior a 5 gr./l.

Actualmente se puede afirmar que la desalación es una tecnología absolutamente implantada en Canarias, donde forma parte integrante del panorama de los recursos hidráulicos. Toda la zona costera de Gran Canaria (lo cual significa la gran mayoría de la población), y el conjunto de las islas de Lanzarote y Fuerteventura, se suministran de la desalación. A ello hay que añadir algunas zonas de la isla de Tenerife, por lo que podemos decir que más de la mitad de la población de Canarias se suministra con aguas desaladas.

2.2.3.4 Técnicas de desalación

La utilización de las diversas técnicas ha evolucionado a lo largo del tiempo, y se han propuesto numerosos procesos para desalación de agua, aunque sólo unos pocos han tenido un desarrollo comercial importante.

Los distintos procesos se han agrupado de acuerdo al principio que se aplica. Podemos, por lo tanto, distinguir tres grandes grupos, los procesos que tienen lugar por cambios de fase en el agua; los que utilizan las propiedades superficiales de las membranas, y otros que utilizan las propiedades de ión selectivo de sólidos y líquidos.

Visualizamos las tecnologías de desalinización de agua de mar que nos ofrecen calidades de agua aceptables para el consumo, la salinidad media del agua de mar es de 34.800 ppm, el límite para el consumo humano es de 1.000 ppm, máximo permisible que depende de las sales disueltas, del consumo diario y del clima. La capacidad instalada en el mundo está sobre el 1000000 m³/d. siendo la desalinización la única forma no convencional para reducir el estrés hídrico de las zonas más secas del planeta, con un coste económico en la actualidad ya aceptable.

La desalinización es un proceso que requiere de un considerable consumo energético. Hay un mínimo gasto termodinámico para convertir el agua salada en dulce, el consumo específico del proceso de desalinización debe hacerse en términos de energía primaria, y no en términos de consumo eléctrico como normalmente dan los suministradores.

2.2.3.5. Procesos de desalinización

La tecnología de desalinización nos ofrece la solución a los problemas de abastecimiento incluso en entornos aislados y se está complementando óptimamente con las energías

renovables. Vamos a detallar los diferentes procesos de desalación que se utilizan en la actualidad.

Procesos en función del principio de conversión:

- Procesos con cambio de fase: Congelación y destilación.
- Procesos con membranas: Osmosis inversa y electrodiálisis.
- Procesos químicos: Intercambio iónico.

Los procesos de destilación y ósmosis inversa son los más competitivos en el mercado:

- Destilación múltiple efecto (MED).
- Evaporación súbita por efecto flash (MSF).
- Compresión de vapor mecánica (VC) o térmica (TVC).
- Osmosis inversa (RO).

También se describen otros procesos que no se han desarrollado a escala industrial debido a su bajo consumo/producción o elevada inversión necesaria, como por ejemplo:

- Destilación solar.
- Congelación.
- Electrodiálisis.
- Intercambio iónico.

▪ **Procesos de cambio de fase: destilación y congelación**

La desalación obtenida por destilación consiste en la evaporación parcial del agua de alimentación: evaporar agua que no contenga sales (éstas son volátiles a partir de 300 °C): el vapor se condensa posteriormente en el interior o exterior de los tubos de la instalación y constituye el agua purificada. Los sistemas desalinizadores funcionan por debajo de la presión atmosférica, necesitan un sistema de vacío (bombas o eyectores), además de extracción del aire y gases no condensables.

▪ **Evaporación por efecto Multiflash (MSF)**

Es el proceso evaporativo más ampliamente utilizado, válido cuando la calidad del agua a desalar no es buena (alta salinidad, temperatura y contaminación). Su adaptación a sistemas de cogeneración favorece su implantación, su consumo específico es elevado (de 12 a 24 kWh/m³).

Su principio de funcionamiento se basa en la presurización del agua de mar y calentada a altas temperaturas, luego es descargado en una cámara flash donde provocamos una caída de presión que es ligeramente inferior a la presión de saturación del vapor de agua, se produce un

“Flashing” (evaporación súbita) de una fracción de esta agua en vapor. Este vapor pasa por un filtro para eliminar las impurezas en suspensión y posteriormente se separa la humedad que puede contener y se condensa en la superficie exterior del intercambiador de calor. El líquido condensado se recoge como agua producto caliente.

La salmuera que no ha sufrido flashing entra en una segunda etapa donde se repite el proceso a una temperatura inferior produciendo nueva cantidad de agua producto, simultáneamente el destilado de la primera etapa pasa a la sección del destilado de la segunda etapa cediendo parte de su calor disminuyendo su temperatura. El proceso de Flashing y enfriamiento se repite hasta que la salmuera y destilado son descargados como rechazo y agua producto.

La operación de una planta MSF está limitada por dos temperaturas: la temperatura máxima del agua salada y la temperatura de la última etapa. La Temperatura máxima depende de la calidad del vapor suministrado externamente, de la prevención de la formación de ‘scale’ y de la concentración de esa agua y el tipo de sales disueltas en ella. Sin embargo, en la temperatura de la última etapa influyen sólo la temperatura de entrada del agua de mar y de la presión que el sistema de vacío puede mantener en esta etapa.

El parámetro de operación básico de una MSF es el GOR (a veces llamado también PR) o cociente de funcionamiento (toneladas de agua dulce producidas por toneladas de vapor consumido). En la práctica un GOR de doce es el límite. La producción depende lógicamente del caudal de agua bruta introducida y del salto térmico disponible (la diferencia entre las dos temperaturas antes comentadas).

Teóricamente el número de etapas no es influyente para un GOR dado, pero el número de etapas determina el área de intercambio de calor y por lo tanto para una producción dada es necesario un número de etapas más o menos fijado. Normalmente se diseñan en torno a veinte etapas con una diferencia entre etapas de unos 3 °C.

▪ **Destilación por múltiple efecto (MED)**

La destilación multiefecto es el proceso de evaporación que utiliza las superficies de un intercambiador, al contrario que en el proceso MSF, aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en el otro lado del mismo. Una planta MED tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, la primera etapa condensa por el interior de los tubos el vapor de proceso, produciendo agua salada evaporada que ha sido proporcionada en forma de ducha horizontal. El vapor formado pasa a la siguiente etapa condensándose en el interior de los tubos y produce una nueva porción de agua dulce, a menor presión. El consumo específico de este tipo de plantas es menor que las MSF (en torno a los 10-15 kWh/m³ de agua producida).

La primera etapa se abastece del vapor externo del sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (o extracción de una de condensación). Se usan compresores térmicos para mejorar el rendimiento de la planta, donde un vapor a media presión recoge parte del vapor generado en la última etapa y se comprime para la primera etapa. Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema.

Existen dos diseños en plantas MED; el de tubos verticales y tubos horizontales, en el primero la salmuera circula en el interior de los tubos mientras el vapor condensa en el exterior de los mismos, en el diseño por tubos horizontales el vapor condensa en el interior de los tubos y la salmuera circula por el exterior, diseño utilizado por la plantas que trabajan a bajas temperaturas incluso utilizando vapor primario con presiones inferiores a 1 at. En ambos sistemas la salmuera parcialmente concentrada se eleva al punto mas alto de la planta para distribuirla a los tubos para su evaporación, tiene la ventaja de aplicarse en forma uniforme sobre la superficie de transferencia de calor, evitando la deposición de partículas sólidas.

- **Compresión de vapor (VC)**

El proceso de compresión de vapor (VC) es similar a la destilación multiefecto, evapora el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura. Un compresor de vapor va acoplado a un intercambiador de tubos verticales de una única etapa, simplificando todos los elementos auxiliares podemos ver que el vapor interior de los tubos es comprimido a presión atmosférica en torno a 0,2 bares (un sobrecalentamiento de unos 5 °C) en un compresor volumétrico especial para trasegar vapor. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa en el exterior de los tubos del intercambiador, siendo recolectado por una bomba en su parte inferior, el consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: habitualmente el consumo está sobre los 10 kWh/m³.

Al igual que las plantas de MED la salmuera circula del fondo del evaporador hacia el distribuidor en la parte superior a fin de conseguir el máximo grado de transferencia de calor y por tanto de evaporación. La eficiencia térmica del proceso mejora notablemente transfiriendo calor residual del producto y la salmuera de rechazo a la corriente de entrada de alimentación. La disposición del compresor puede ser vertical como horizontal.

- **Destilación solar**

Los colectores solares son los sistemas adecuados para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector: tan sólo pueden destilarse unos litros al día. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce.

En el sistema de destilación por colectores; el principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en el fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y factores aleatorios como la velocidad del viento, una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Se puede utilizar técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes o espejos (parabólicos o lisos), pero no suelen compensar las mayores pérdidas que ello acarrea.

- **Proceso de congelación**

Esta tecnología consiste en congelar el agua de alimentación en contacto con el refrigerante que se evapora, se recogen los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener agua de pureza elevada que es independiente de la concentración del agua inicial, parte del agua purificada se utiliza para lavar el hielo de la salmuera, el resto es descargada como agua producto. Es un proceso no comercializado en escala industrial por problemas con el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo y su adaptación a la tecnología de intercambiadores de frío.

2.2.3.6. Procesos con membranas

- **Ósmosis inversa**

Es un proceso que aplica una presión externa mayor que la presión osmótica de una disolución, utiliza la fuerza motriz como fuente energética y trabaja a temperatura ambiente, una fracción del contenido de agua de mar es introducido a alta presión a través de la membrana semipermeable donde existe un balance dinámico entre el flujo de las moléculas de agua pura y la difusión de iones inorgánicos, esto permite un amplio rango de paso de sales que define la relación del contenido en sales en el producto respecto al del agua de alimentación. El paso de sales y el flujo del agua por unidad de superficie se controlan a través de la composición de la membrana y la técnica de fabricación.

La cantidad de permeado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua bruta. La salmuera rechazada es aprovechada para producir energía a través de turbinas de recuperación con lo que disminuye el gasto energético que requiere el proceso.

El diseño de la planta de Ósmosis Inversa es mucho más compleja que considerar únicamente tipos de membranas y bomba alta presión, es necesario definir y optimizar parámetros y determinar métodos de pretratamiento del agua de alimentación que afectan la vida de las membranas e inciden en el consumo energético, generalmente estos requieren de sistemas de desinfección, filtración, acidificación, inhibidores de precipitación, microfiltración.

Los módulos de membrana utilizados son de fibra hueca y de espiral, diseñados ambos para contener flujos de alta presión en menor volumen para una superficie de membrana dado. En el diseño de enrollamiento en espiral las membranas están enrolladas en torno a un tubo central perforado que recoge el agua producto; el concentrado sale por el extremo de la espiral, suelen conectarse en serie o paralelo. Las membranas de fibra hueca contienen un gran número de haces tan finas como el pelo humano con su punta pegada a una resina epoxy y mantenidos a presión.

El agua salada presurizada circula por fuera de las fibras mientras el filtrado circula por el interior de las mismas hacia el final de la fibra donde se recoge el permeado. El consumo específico de las instalación de ósmosis inversa en la actualidad está entre los 4-6 kWh/m³, se

aprovecha que la salmuera es rechazada a alta presión para recuperar energía mediante turbinas (Pelton convencional con un ahorro medio del 40%); o bien utilizar un intercambiador de presión (PE), que por el principio del desplazamiento positivo presuriza parte del agua bruta con la salmuera a presión rechazada en el proceso y permite ahorros de hasta el 50-65% en el consumo.

▪ **Electrodialisis**

Este proceso consiste en la desmineralización de aguas salobres consiguiendo que iones de diferente signo se muevan hacia zonas divergentes gracias a un campo eléctrico creado con una diferencia de potencial aplicada sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permiten sólo el paso de los iones en una solución electrolítica (agua salada).

En el proceso se observa a los iones dirigirse a los diferentes compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas el agua pura. Sin embargo, este proceso tienen una limitante que funciona para aguas salobres de uno a tres gramos por litro de sal en el agua, con un rechazo en torno al 75% y un consumo específico pequeño, sobre estos rangos de operación el consumo de dispara y pierde su competitividad.

2.2.3.7 Procesos químicos

▪ **Intercambio iónico**

Las resinas de intercambio iónico son sustancias insolubles. En contacto con una solución, intercambian iones con la sal disuelta. Presentan dos tipos de resinas: aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones OH⁻ (permutación básica); y resinas catiónicas que sustituyen cationes por iones H⁺ (permutación ácida).

La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal no excede 1 g/l. Es usada generalmente para acondicionar aguas para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, de poca salinidad pero con alto contenido en calcio y magnesio. Las resinas suelen ser regeneradas con agentes químicos que permiten sustituir los iones originales y los fijados en la resina.

2.2.3.8 Aspectos Económicos

El bajo precio de la energía eléctrica frente al de los combustibles fósiles en nuestro país (consumidos por las tecnologías de múltiple efecto MED, compresión de vapor CV y destilación flash MSF), la aparición de los sistemas de recuperación de energía de la salmuera, y el abaratamiento y mejora de las capacidades de las membranas, ha supuesto que la OI sea la tecnología aplicada actualmente en España, la electrodiálisis (ED) suele competir con la OI para aguas salobres de bajo contenido salino (< 2.000 mg/l de sal).

En la siguiente tabla exponemos una relación de los principales procesos de desalinización:

Parámetro	MSF	MED	CV	OI	ED
Consumo eléctrico (kWh/m ³)	3,5	1,5	8-14,3	3 - 6	1
Calidad producto (ppm)	< 50	< 50	< 50	< 500	< 500
Producción por unidad (m ³ /día)	50.00-60.000	100-20.000	10-2.500	1-10.000	1-12.000
Coste instalaciones	alto	alto/medio	Alto	medio	medio
Posibilidad ampliación	difícil	difícil	Difícil	fácil	fácil
Fiabilidad de operación	alta	media	Baja	alta	alta
Desalación de agua de mar	sí	sí	Sí	sí	no

Fuente : { Javier Uche y Antonio Valero }

Tabla 2.7. Métodos de desalación a gran escala

Se ha expuesto un resumen del estado actual de la tecnología de desalación, conteniendo el principio de operación, instalación típica, parámetros característicos, consumos y rangos de aplicación.

El proceso de Osmosis Inversa actualmente es el de más desarrollo y permite la conexión de diferentes fuentes de energía (solar, eólica, vapor, cogeneración...), que permiten un estudio conjunto de las posibilidades de ahorro energético en el proceso, vamos a analizarlo más profundamente al ser la tecnología desalinizadora que actúa en el proyecto. .

Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica de Origen Eólico

3.1 Introducción

El viento es, fundamentalmente, una consecuencia de la radiación solar que incide sobre la Tierra, y que origina el calentamiento de las masas de aire que la circundan (Carta et al, 2009 Hidy,1972). El hecho de que este calentamiento sea mayor en el ecuador que en los polos da lugar a corrientes ascendentes en el ecuador, y descendentes en los polos. Este gran movimiento del aire se ve perturbado por la rotación de la Tierra, lo que hace que la corriente se desvíe en sentido contrario a la rotación del planeta, y se rompa en un conjunto de tres grandes anillos circulatorios de aire. El resultado de todo ello son las grandes corrientes de viento a escala planetaria.

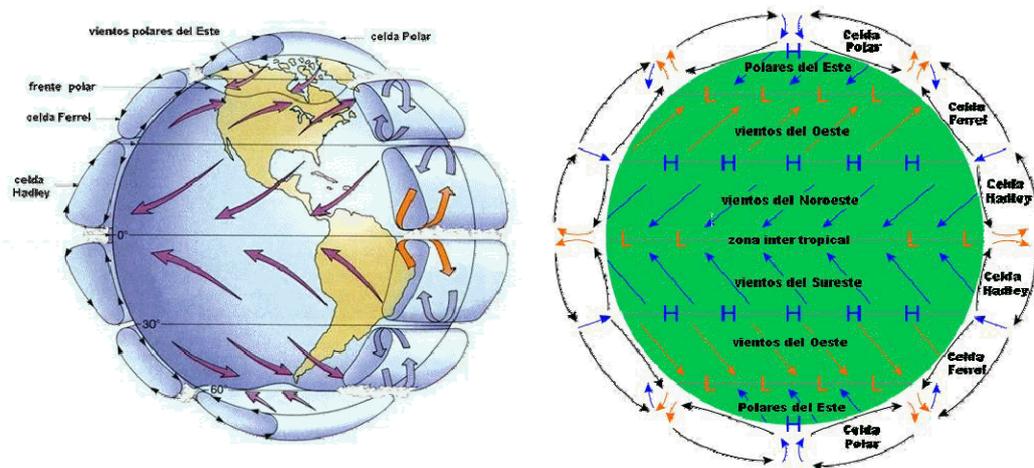


Figura 3.1 Corrientes de Viento a escala planetaria

Estas leyes definen los movimientos generales del desplazamiento de masas de aire, es decir, del viento. Se puede prever la dirección de los vientos dominantes en la mayor parte de las zonas del globo terrestre con cierta seguridad. Sin embargo, estas direcciones únicas están frecuentemente perturbadas por:

- **Las tormentas**, que desvían la dirección dominante, como se hace patente en los registros de datos.
- **Los obstáculos naturales**, que modifican la relación de fuerzas, de tal manera que en el suelo el aire está menos desviado hacia la derecha que en niveles más altos y que los obstáculos elevados modifican de manera notable la circulación general de las masas de aire.
- **Las depresiones ciclónicas**, que pueden desplazarse en cualquier dirección pero que, de hecho, tienen tendencia a ir en ciertas direcciones establecidas superponiéndose al sistema general de la presión atmosférica.

Los vientos también son originados por efectos locales derivados de los diferentes niveles de calentamiento y enfriamiento del mar y la tierra, lo que da lugar a las brisas marinas. Durante el día, la tierra se calienta más que el mar, haciendo que el aire sobre la superficie terrestre ascienda, y originando una circulación del aire marino hacia la tierra en las capas bajas. El fenómeno contrario ocurre en las horas nocturnas, originándose a nivel del suelo un movimiento del aire situado sobre la tierra hacia el mar. En los valles del interior puede originarse un fenómeno parecido, debido a las diferencias de insolación entre las laderas y el llano.

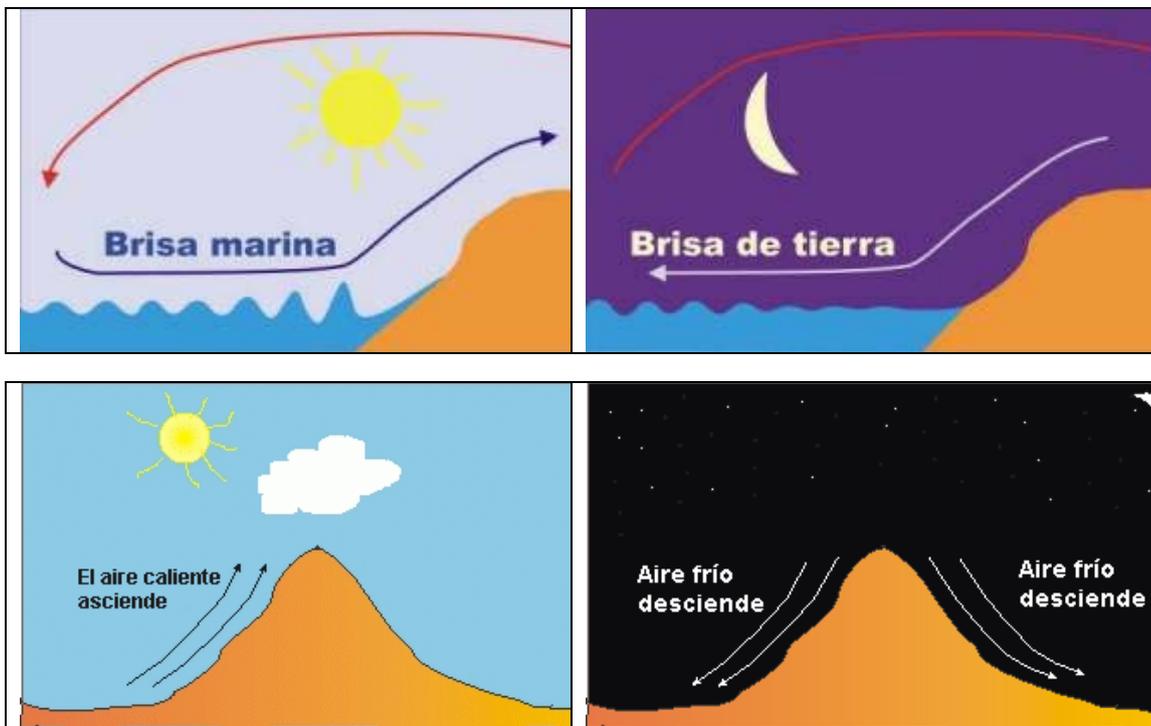


Figura 3.2 Efecto local mar-tierra montaña-aire

Lógicamente en una zona dada del planeta, estos efectos locales se suman a los movimientos generales del aire, modificándolos en el sentido de aumentar o disminuir la intensidad del viento. Como hemos señalado, el viento también se ve modificado por la orografía de la

superficie sobre la que se mueve. Debido a la viscosidad del propio aire, este tiende a quedarse “pegado” al terreno, mientras que se desplaza con más facilidad en las capas altas dando así lugar al típico perfil parabólico.

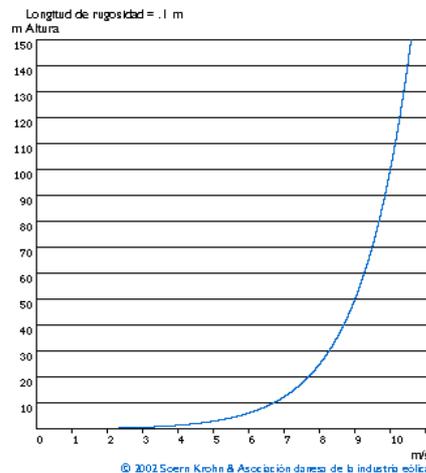


Figura 3.3 Perfil parabólico típico

La orografía del terreno también tiene gran influencia en los valores de la intensidad del viento a pequeña escala, originándose cambios en el perfil, parabólico anterior que en algunos casos puede tener una importancia considerable.

Las Islas Canarias se encuentran situadas en la zona de los vientos alisios del EN. Durante el verano, gran parte de la primavera y aún parte del otoño, la frecuencia del régimen de alisios es muy alta siendo del 90 al 95 % del tiempo durante el verano.

En el invierno, el límite septentrional de la región de los alisios baja de latitud, pero aún quedan las Islas Canarias dentro de esta zona de régimen de vientos, aunque cerca de su límite superior. Por ello, los vientos alisios en invierno tienen una velocidad media menor y su frecuencia sólo llega al 50 %.

Estos vientos alisios, muy regulares y de velocidad media moderada son ideales para el aprovechamiento de la energía eólica. En términos generales se suele estimar que en las zonas llanas de las islas próximas a las costas sometidas a dicho régimen de vientos, las velocidades medias anuales del viento son del orden de los 5-7 m/s , proporcionando valores energéticos medios anuales tipo medio, pero estas velocidades pueden incrementarse notablemente a causa de los bien conocidos efectos orográficos, alcanzando en elevaciones de montañas de condiciones topográficas favorables y bien orientadas velocidades medias anuales de 9-10 m/s. O incluso superiores, con valores de potencia media anual por encima de los 800-1000 W / m², que se clasifican ya como muy altos.

3.1.1. Variación de la velocidad del viento con la altura y rugosidad del terreno.

Existen dos problemas fundamentales ligados al perfil vertical del viento, que interesan en energía eólica (Justus,1980).

1. El perfil vertical de las velocidades de viento instantáneas (por ejemplo el viento medio sobre uno o dos minutos).
2. El perfil vertical de las velocidades medias de viento (por ejemplo las medias mensuales o anuales), o de las distribuciones de frecuencias de viento medio.

Estos son los dos problemas distintos e independientes, sin posibilidad de ser tratados por medio de un único método. La proyección de los perfiles verticales de vientos instantáneos está muy estudiada, utilizándose la teoría de la capa límite turbulenta. Por el contrario, la proyección vertical de las velocidades medias durante largos períodos está relacionada con las estadísticas sobre la ocurrencia de los diversos fenómenos que la influyen, tales como la estabilidad de la atmósfera y su estudio necesita una aproximación más empírica.

Si se aplica la teoría de la capa límite similar a la parte inferior de la capa límite atmosférica se obtiene el perfil vertical de las velocidades de viento instantáneas valido hasta una altura sobre la superficie del orden de los 100 metros

La variación vertical de la velocidad media del viento para intervalos de tiempo largos puede ser representada con una buena aproximación por medio de la ley del perfil de potencia, (variación de la potencia con la altura), que viene dada por (Carta et al,2009):

$$V_2 = V_1 \left[\frac{Z_2}{Z_1} \right]^n$$

Donde n es un exponente cuyo valor puede depender de:

- Las alturas de referencia Z1 y Z2
- La estabilidad atmosférica.
- La velocidad del viento.
- Y la rugosidad del terreno.

Así pues, para conocer la variación de la velocidad media con la altura es necesario determinar la dependencia de n respecto de la rugosidad y de la estabilidad. Para ello existen varios métodos propuestos. Se ha escogido la denominada ley potencial modificada Mikhail y Justus.

Justus y Mikhail (1976) propusieron una relación logarítmica entre el exponente de la ley potencial y la velocidad del viento; esta relación, que está basada en un ajuste por mínimos

cuadrados, da la variación con la altura de la velocidad del viento y de los parámetros que describen la distribución de frecuencia de la velocidad del viento. El modelo de la ley potencial dada por Justus y Mikhail, y modificada por ellos mismos es:

$$\langle V \rangle = \langle V_a \rangle \left[\frac{Z}{Z_a} \right]^n$$

Donde:

$\langle V \rangle$ (m/s) es la velocidad media del viento a la altura Z (m)

$\langle V_a \rangle$ (m/s) es la velocidad media del viento a la altura Z_a (m)

n viene dada por la expresión:

$$n = \frac{1}{L \left(\frac{Z_g}{Z_0} \right)} - \left[\frac{0,088}{1 - 0,088 * L \left(\frac{Z_a}{10} \right)} \right] L \left[\frac{\langle V_a \rangle}{6} \right]$$

Donde Z_g (m) es la media geométrica de las alturas, Z_a y Z

$$Z_g = \sqrt{Z Z_a}$$

y Z_0 es la longitud de la rugosidad del terreno del sitio en estudio.

La rugosidad superficial describe la textura del terreno; en una determinada superficie se calcula por la medida y la distribución de los elementos rugosos que contiene, así para superficies de tierra estos elementos son típicamente vegetación, áreas edificadas y tipo de suelo.

La rugosidad del terreno se acostumbra a parametrizar por una escala de longitud llamada: *parámetro de rugosidad o longitud de la rugosidad del terreno Z_0* .

La rugosidad impide que el viento influya sobre el terreno. Un terreno llano con rugosidad superficial uniforme es el tipo de terreno más simple para colocar las máquinas. Un área grande de terreno de pasto es un buen ejemplo de terreno uniforme. Sólo hay una forma de incrementar la potencia disponible en terreno uniforme y es levantar la máquina a la mayor altura posible desde el nivel del suelo. Una medida o estimación de la velocidad media a un nivel dado puede emplearse para estimar la velocidad del viento a otros niveles.

Cuando las características del terreno cambian bruscamente como es el caso del mar a la tierra o de un campo de cultivo a un bosque, etc., se dice que la rugosidad no es uniforme. El problema se aborda generando, a partir de tal discontinuidad, una capa límite, cuya altura crece con la distancia al punto de cambio dependiendo del grado de turbulencia.

La longitud de la rugosidad del terreno Z_0 es un parámetro que representa la obstrucción física del viento. Se puede calcular la rugosidad del terreno en una determinada zona si se instala un poste anemométrico y se toman medidas del viento a diferentes alturas ajustándose a un perfil logarítmico de velocidades. Sin embargo, el problema se complica, si se pretende estimar Z_0 a base de observaciones visuales y dimensiones de las características del terreno y los obstáculos que sobre él existen.

Frost y Nowak (1977) sugirieron la estimación de la longitud de la rugosidad del terreno según los valores dados en la siguiente tabla;

Tipo de superficie	Z_0 (m)
Barro liso, hielo	$10^{-5} - 3 \times 10^{-5}$
Mar en calma	$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$
Arena	$10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$
Llanura cubierta de nieve	$4,9 \times 10^{-3}$
Superficie cubierta de hierba	0,017
Hierba cortada	$10^{-3} - 0,01$
Hierba baja o estepa	0,032
Región llana	0,021
Hierba alta	0,039
Trigal	0,045
Remolacha	0,64
Palmito	1,10 - 0,3
Bosque bajo	0,05 - 0,1
Bosque alto	0,2 - 0,9
Suburbios	1 - 2
Ciudad	1 - 4

Tabla 3.1 Longitudes de rugosidad el terreno según Frost y Novak

Anteriormente, Paeschke (1937) había estimado otros valores de Z_0 , para varios tipos de cultivos:

Cultivos	Z_0 (m)
Superficie cubierta de nieve	0,0049
Superficie cubierta de hierba	0,0173
Región o terreno liso	0,0214
Hierba baja	0,032
Hierba alta	0,0394
Trigal	0,045
Remolacha	0,064

Tabla 3.2 Longitudes de rugosidad el terreno según Paeschke

3.2 Análisis de los regímenes de viento

3.2.1 Análisis estadístico de los datos de viento.

La distribución probabilística de los datos de viento es importante en el estudio de la energía eólica. Los datos de viento registrados pueden someterse a diversos tratamientos estadísticos, que permiten un mejor análisis y comprensión de su comportamiento. Entre éstos destacan la confección de “distribuciones de la velocidad” (tanto temporales como de frecuencias), “modelos de simulación temporal” del comportamiento del viento (para predicciones futuras) y estudio de “ correlaciones “(relación entre las medidas del viento en dos puntos diferentes). Los diferentes tratamientos estadísticos son (Carta et al, 2009):

- Velocidades Medias Horarias Diarias
- Velocidades Medias Diarias y Mensuales
- Frecuencias de Velocidades Medias
- Frecuencias Acumuladas de Velocidades Medias
- Ley de Distribución Matemática
- Direcciones
- Calmas y rachas Mensuales
- Previsión a Largo Plazo
- Simulación de Datos

3.2.1.1. Velocidades Medias Horarias

Las velocidades medias horarias diarias nos muestran la variación de esta magnitud a lo largo de las 24 horas del día medio dentro de un período determinado.

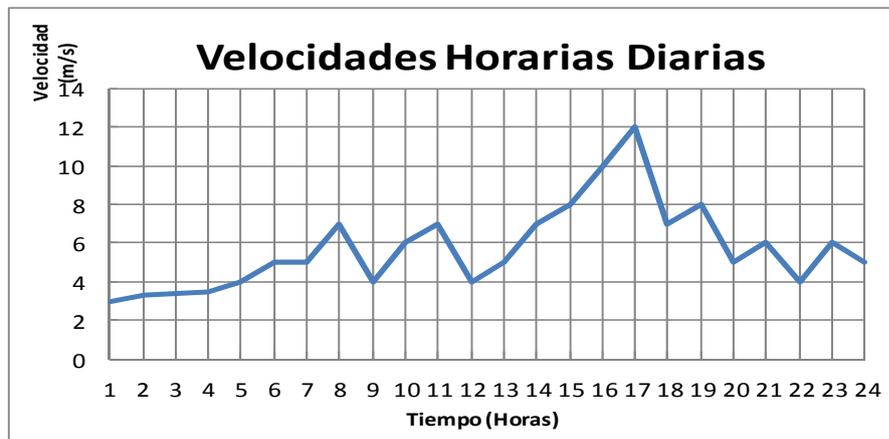


Figura. 3.4 Gráfica de Velocidades Medias Horarias

3.2.1.2. Velocidades Medias Diarias

Las velocidades medias diarias son representadas en un gráfico a lo largo del período de estudio elegido.

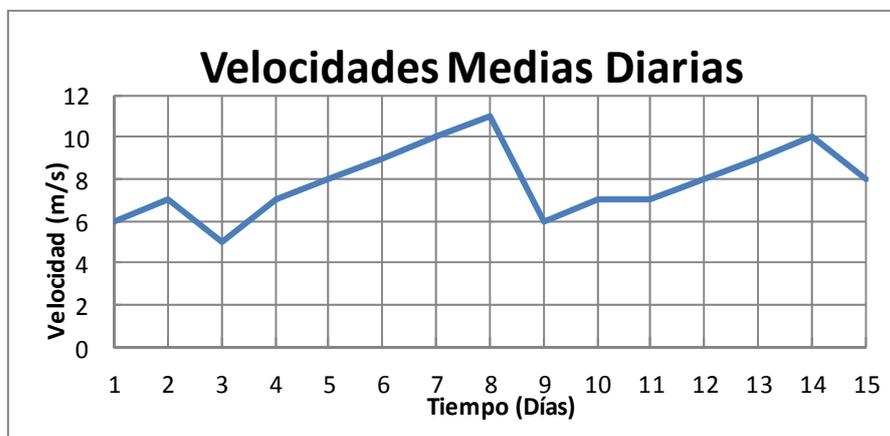


Figura. 3.5 Gráfica de Velocidades Medias Diarias

3.2.1.3. Velocidades Medias Mensuales

En la gráfica de velocidades medias mensuales representamos las medias para diferentes años de estudio.

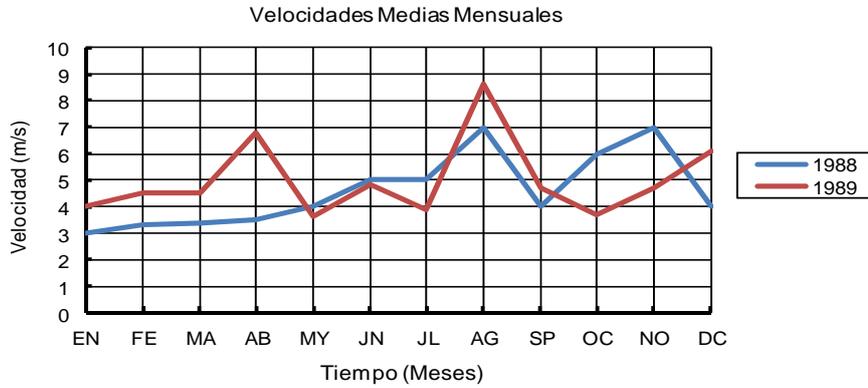


Figura. 3.6 Gráfica de Velocidades Medias Mensuales

3.2.1.4. Histogramas de Frecuencias.

En el histograma de frecuencias estudiamos cómo se distribuye a velocidad del viento en un intervalo de tiempo determinado. La distribución de frecuencias representa el tanto por ciento de horas en un período dado (mes, año, etc.) en que la velocidad se encuentra entre dos valores. Los resultados pueden venir reflejados en tablas o representados gráficamente. En el diagrama de distribución de frecuencias, la abscisa correspondiente al punto más alto es la “moda de la velocidad”. Este valor no coincide generalmente con la “velocidad media” para el período considerado, siendo normalmente menor la “moda de la velocidad” que la “velocidad media”.

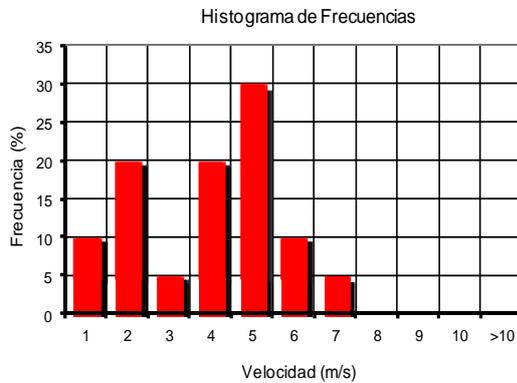


Figura 3.7 Histograma de Frecuencias de Velocidades

Análogamente en el histograma de frecuencias acumuladas representamos estos valores para cada rango de velocidades. En el diagrama de distribución de frecuencias acumuladas, cuanto más plano sea este diagrama (pequeña pendiente), más constantes serán las velocidades del lugar.

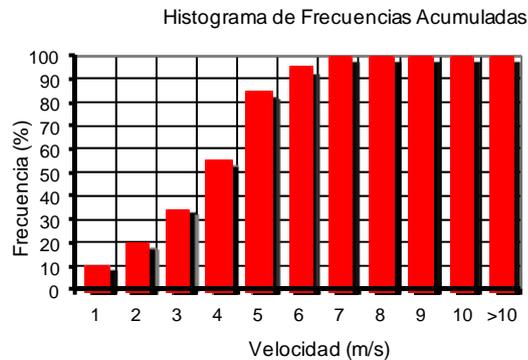


Figura. 3.8 Histograma de frecuencias acumuladas

3.2.2. Representación matemática de los regímenes de viento.

3.2.2.1. La distribución de Weibull

La distribución de Weibull recibe el nombre del físico sueco Waloddi Weibull (1939) quien la usó para representar la distribución de la resistencia a la rotura de materiales. Posteriormente esta función ha sido usada en una amplia variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran los estudios estadísticos del viento. Trabajos de Justus et al (1978), Baynes (1974), Hennessey (1977), Ramírez y Carta (2005), Carta et al (2009b) han demostrado su utilidad en el estudio de la energía eólica.

Se dice que una variable aleatoria V tiene una distribución de Weibull si su función de densidad de probabilidad viene dada por:

$$f(v; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right] & v > 0; \alpha, \beta > 0 \\ 0 & \forall \text{ otro valor} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

La distribución de Weibull es una familia de distribuciones que dependen de dos parámetros: el de forma α y el de escala β . La influencia del parámetro de forma α en la función de densidad $f(v, \alpha, \beta)$ se representa en la Figura 3.9. Para $\alpha > 1$ la función tiene un máximo alejado del origen, mientras que para $\alpha \leq 1$ es continuamente creciente. Para $\alpha = 1$ la función de distribución se transforma en una exponencial, para $\alpha = 2$ la función deriva en la distribución de Rayleigh y con $\alpha = 3.5$ se aproxima bastante a una ley Normal (Gausiana).

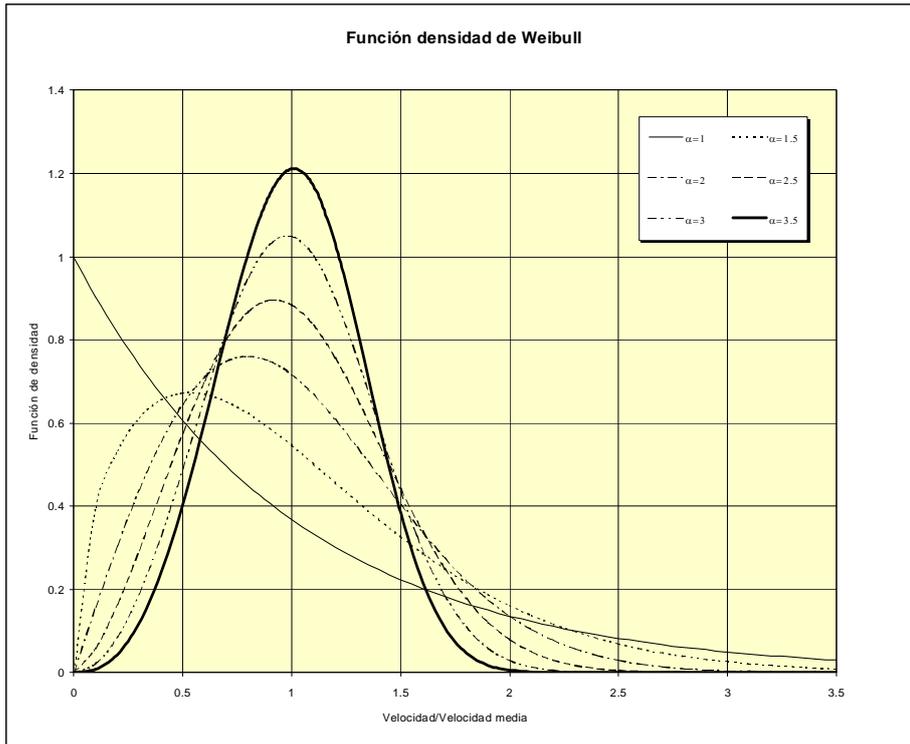


Figura 3.9. Función de densidad de Weibull

La función de distribución $F(v, \alpha, \beta)$ de Weibull podrá ser determinada a partir de la función de densidad de probabilidad mediante:

$$F(v; \alpha, \beta) = \Pr(V \leq v) = \int_0^v \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right] \cdot dv \quad (III.2)$$

Realizando el cambio de variables (III.3) y sustituyendo en (III.2), se obtiene (III.4).

$$y = \left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha \rightarrow v = \beta \cdot y^{\frac{1}{\alpha}} \rightarrow dv = \frac{\beta}{\alpha} \cdot y^{\frac{1}{\alpha}-1} \cdot dy \quad (III.3)$$

$$F(v; \alpha, \beta) = \int_0^{\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha} e^{-y} \cdot dy = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (III.4)$$

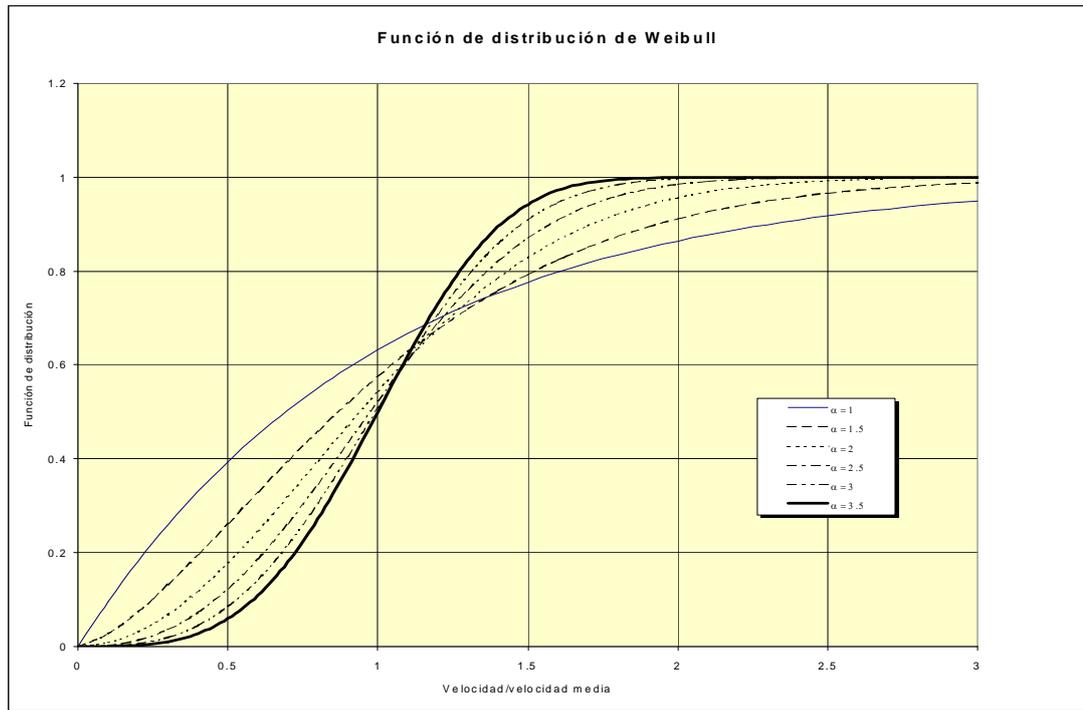


Figura 3.10. Función de distribución de Weibull

3.2.2.2. Momentos de la Distribución de Weibull

El r-ésimo momento de V respecto al origen es evaluado por la integral (III.2)

$$\mu'_r(V) = \int_0^{\infty} v^r \cdot f(v, \alpha, \beta) \cdot dv \quad (III.5)$$

Por tanto:

$$\mu'_r = \int_0^{\infty} v^r \cdot \left[\frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\alpha-1} \exp \left[- \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\alpha} \right] \right] \cdot dv \quad (III.6)$$

Realizando el cambio de variables (III.3) y sustituyendo en (III.6) se tiene

$$\mu'_r = \beta^r \cdot \int_0^{\infty} y^{\left(\frac{r}{\alpha} + 1 \right) - 1} \cdot e^{-y} \cdot dy = \beta^r \cdot \Gamma \left[1 + \frac{r}{\alpha} \right] \quad (III.7)$$

Donde Γ es la función gamma de Euler.

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} \cdot e^{-t} \cdot dt \quad (III.8)$$

El momento respecto al origen de primer orden será la *media de la distribución*, y se determinará haciendo $r=1$ en la ecuación (III.7)

$$E(V) = \bar{V} = \mu = \mu'_1 = \beta \cdot \Gamma\left[1 + \frac{1}{\alpha}\right] \quad (III.9)$$

La *varianza de la distribución* es el momento de segundo orden respecto de la media

$$\mu_2 = Var(V) = \sigma^2 = E(V - \mu)^2 = \mu'_2 - \mu^2 = \beta^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \left[\beta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^2 \quad (III.10)$$

El tercer momento estandarizado respecto de la media, denominado *coeficiente de asimetría* (α_3), depende solamente del factor de forma α , y viene dado por:

$$\alpha_3 = \frac{\mu_3}{(\mu_2)^{3/2}} = \frac{E(V - \mu)^3}{(\mu_2)^{3/2}} = \frac{\mu'_3 - 3 \cdot \mu \cdot \mu'_2 + 2 \cdot \mu^3}{(\mu'_2 - \mu^2)^{3/2}} = \quad (III.11)$$

$$= \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) - 3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) + 2 \cdot \Gamma^3\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^{3/2}}$$

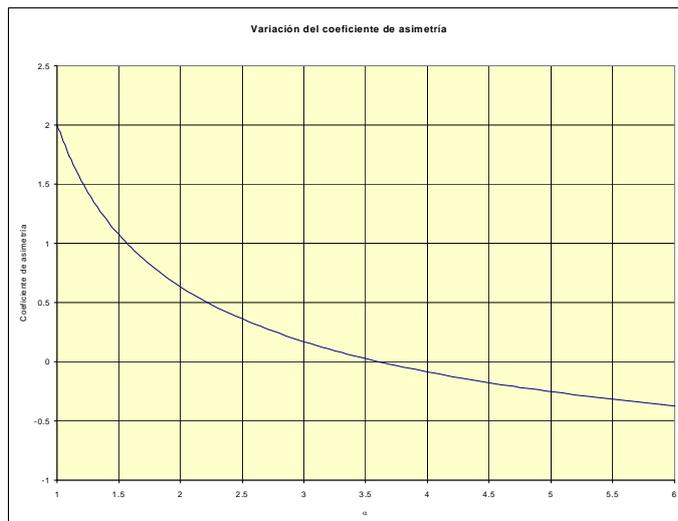


Figura 3.11. Variación del coeficiente de asimetría en función del factor de forma

El cuarto momento central estandarizado, denominado *coeficiente de curtosis* (α_4), viene dado por:

$$\alpha_4 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} = \frac{E(V - \mu)^4}{\mu_2^2} = \frac{\mu_4' - 4 \cdot \mu \cdot \mu_3' + 6 \cdot \mu^2 \cdot \mu_2' - 3\mu^4}{(\mu_2' - \mu^2)^2} =$$

$$= \frac{\Gamma\left(1 + \frac{4}{\alpha}\right) - 4 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{\alpha}\right) + 6 \cdot \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - 3 \cdot \Gamma^4\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)\right]^2} \quad (\text{III.12})$$

El *coeficiente de variación* cv , definido como el cociente entre la desviación estándar σ y la media μ , vendrá dado por:

$$cv = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\mu} = \sqrt{\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{\alpha}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} - 1} \quad (\text{III.13})$$

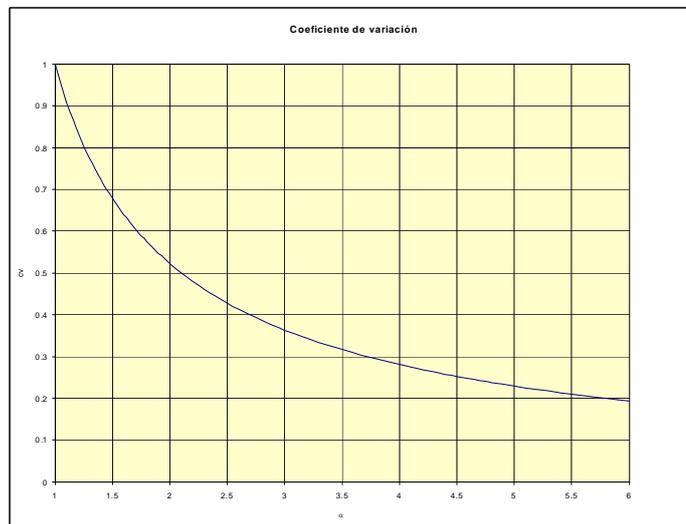


Figura 3.12. Variación del coeficiente de variación en función del factor de forma

La *moda de la distribución*, es decir el valor más frecuente, puede ser determinada calculando el máximo de la función densidad de probabilidad (III.1)

$$\frac{\alpha}{\beta} \cdot \left\{ (\alpha-1) \cdot \left(\frac{v}{\beta} \right)^{\alpha-2} - \alpha \cdot \left(\frac{v}{\beta} \right)^{2(\alpha-1)} \right\} = 0 \rightarrow v_{0.5} = \beta \cdot \left[\frac{\alpha-1}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{III.14})$$

El cuantil de orden q es, de acuerdo con (III.4):

$$q = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v_q}{\beta} \right)^\alpha \right] \rightarrow v_q = \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1-q} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{III.15})$$

La mediana de la distribución, es decir el percentil cincuenta, puede ser obtenida de la ecuación (III.15)

$$V_m = \beta \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1-0.5} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} = \beta \cdot \left[\ln(2) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (\text{III.16})$$

3.2.2.3. Estimación de los parámetros de Weibull

3.2.2.3.1 El Método de los Momentos

Este método consiste en igualar los momentos apropiados de la distribución de la población (representada en este caso por la distribución de Weibull), con los correspondientes momentos de la muestra para estimar los parámetros desconocidos de la población (α y β en este caso) (Carta et al,2009b).

Tradicionalmente se suelen tomar como momentos de la muestra la media y el coeficiente de variación. Por tanto, si se dispone de una muestra de n datos de velocidad del viento ($v_i ; i = 1 \dots n$), la media y el coeficiente de variación de la misma vendrán dados por:

$$\text{Media de la muestra} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (\text{III.17})$$

$$\text{Coeficiente de variación de la muestra} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}} \quad (\text{III.18})$$

De acuerdo con el método de los momentos, igualando (III.9) con (2.17) y (III.13) con (III.18), se dispone del sistema de ecuaciones siguiente:

$$\bar{V} = \beta \cdot \Gamma \left[1 + \frac{1}{\alpha} \right] = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n} \quad (\text{III.19})$$

$$cv = \frac{\sqrt{\frac{\Gamma \left(1 + \frac{2}{\alpha} \right)}{\Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right)} - 1}}{\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}} \quad (\text{III.20})$$

El parámetro de forma α puede ser estimado a partir de la ecuación (III.20) o mediante la Figura 2.5., la cual puede ser aproximada por la ecuación siguiente:

$$\alpha = \left[\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n-1}}}{\frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n}} \right]^{-1.086} \quad (\text{III.21})$$

El parámetro de escala β podrá ser estimado a partir de la ecuación (III.19):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n \cdot \Gamma \left(1 + 1/\alpha \right)} \quad (\text{III.22})$$

3.2.2.3.2. El Método de los Mínimos cuadrados

Si los valores observados de la velocidad se agrupan en n intervalos de velocidad $0-v_1, v_1-v_2, v_2-v_3, \dots, v_{n-1}-v_n$, asignando a cada intervalo su frecuencia de ocurrencia f_1, f_2, \dots, f_n , los parámetros C y K de Weibull pueden ser determinados por un ajuste (Carta et al, 2009b), utilizando el método de los mínimos cuadrados con las frecuencias acumuladas $P_1=f_1; P_2=P_1+f_2; \dots; P_n=P_{n-1}+f_n$.

Para ello se calculará la recta de regresión de $y=A+Bx$ donde:

$$x_i = \ln V_i \quad V_i = \text{velocidad máxima del intervalo } i$$

$$y_i = \ln(-\ln(1-P_i))$$

Determinaremos los parámetros A y B con la condición de que el momento

$$M = \sum_1^n (y_i - A - Bx_i)^2$$

sea mínimo.

Para ello anularemos las derivadas parciales

$$\frac{\partial M}{\partial A} \quad \text{y} \quad \frac{\partial M}{\partial B}$$

$$\frac{\partial M}{\partial A} = -2 \sum_1^n (y_i - A - Bx_i) = 0$$

$$\frac{\partial M}{\partial B} = -2 \sum_1^n (y_i - A - Bx_i)x_i = 0$$

Suprimiendo el factor -2 tenemos:

$$\sum_1^n (y_i - A - Bx_i) = \sum_1^n y_i - nA - B \sum_1^n x_i = 0$$

$$\sum_1^n x_i (y_i - A - Bx_i) = \sum_1^n x_i y_i - A \sum_1^n x_i - B \sum_1^n x_i^2 = 0$$

Despejando A y B tenemos:

$$A = \frac{n \sum_1^n y_i \sum_1^n x_i^2 - \sum_1^n x_i \sum_1^n x_i y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}$$

$$B = \frac{n \sum_1^n x_i y_i - \sum_1^n x_i \sum_1^n y_i}{n \sum_1^n x_i^2 - (\sum_1^n x_i)^2}$$

Tras la obtención de **A** y **B**, los parámetros **C** y **K** de Weibull se calcularán por las relaciones siguientes:

$$K = B \quad ; \quad C = e^{-A/B}$$

3.2.2.3.3. El Método de la Máxima Verosimilitud

El método de la máxima verosimilitud fue descrito con detalle por Kendall et al (1961)

Si tenemos una variable aleatoria continua con función de densidad:

$$f(v, k, c) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

La función de densidad conjunta para una muestra aleatoria simple **v1, v2, ..., vn** será:

$$f(V, k, c) = \prod_1^n f(v_i, k, c) = \left[\frac{k}{c}\right]^n \prod_1^n \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k}$$

Si en esta función de densidad muestral variamos **K** y **C** y fijamos **V** obtenemos la denominada Función de Verosimilitud.

Derivando respecto a los parámetros K y C el logaritmo neperiano de la función de verosimilitud, ya que ésta y su logaritmo alcanzan el máximo en el mismo punto e igualando a cero esas expresiones:

$$L(f(v_i, k, c)) = nL\left(\frac{1}{c}\right) + nL(k) + (k-1) \sum L(v_i) - \left(\frac{1}{c}\right) \sum v_i^k$$

$$\frac{dL(f(v_i, k, c))}{dc} = \frac{dL(f(v_i, k, c))}{dk} = 0$$

De las cuales obtenemos:

$$k = \left[\frac{\sum_1^n v_i^k L(v_i)}{\sum_1^n v_i^k} - \frac{\sum_1^n L(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad c = \left[\frac{1}{n} \sum_1^n v_i^k \right]^{\frac{1}{k}}$$

3.2.2.3.4. El Método del Factor de irregularidad

Si definimos el factor de irregularidad **Ke** (Carta et al, 2009b) como la relación entre la energía eólica disponible, calculada en función de la media del cubo de la velocidad del viento, y la que se obtiene a partir del cubo de la velocidad media, tendremos que:

$$K_e = \frac{E_d}{E_d(v^3)}$$

donde $E_d (Kw h/m^2) = (< Pd > / A) Nh / 1000$; $Nh : N^o de horas.$

La potencia media del viento viene dada por la expresión:

$$< Pd > = 1/2 \rho < v^3 >$$

Por lo tanto la potencia media disponible por unidad de área barrida, viene dada por $< Pd > / A$, de lo cual podremos deducir la energía eólica disponible en un determinado período de tiempo. Para ello multiplicaremos la potencia por el número de horas **Nh** de dicho período de tiempo.

$$E_d = ((1/2 \rho < v^3 >) / A) (Nh / 1000)$$

Mientras que a partir del cubo de la velocidad media tendré que la potencia disponible por unidad de superficie viene dada por:

$$Pd = (1/2 \rho < v^3 >) / A$$

Luego el factor de irregularidad K_e viene dado por:

$$K_e = \frac{\langle v^3 \rangle}{\langle v \rangle^3} = \frac{c^3 \Gamma(1 + 3/k)}{[c \Gamma(1 + 1/k)]^3} = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma(1 + 1/k)^3}$$

De los datos observados experimentalmente podremos calcular un factor de irregularidad experimental:

$$K_e = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \right]^3}$$

Igualando esta expresión a la anterior se determinará fácilmente el parámetro de forma K . El parámetro de escala C es estimado, mediante el método de los momentos anteriormente desarrollado.

3.2.2.3.5. Comparativa entre los diferentes métodos.

Diferentes experimentos realizados por varios grupos de investigadores han llevado a la conclusión de que no existen diferencias significativas entre los diferentes métodos. Aún así podemos extraer una serie de conclusiones:

1. El método de ajuste por mínimos cuadrados es el más apropiado y que mejores resultados da en la estimación de los parámetros de forma y de escala de la función de Weibull.
2. Este modelo no es particularmente bueno para los intervalos de velocidad más bajos.
3. En el método de la máxima verosimilitud, ajustamos los parámetros K y C a la función de densidad de Weibull, mientras que con el método de los mínimos cuadrados se ajusta la función de Weibull a la distribución muestral para que la distancia sea mínima. Luego este último modelo dará una mejor estimación. Evidentemente si los datos muestrales fueran totalmente independientes (cosa que no sucede) los dos métodos darían la misma estimación.
4. Finalmente, el método de los momentos no tiene tan buenas propiedades como el de máxima verosimilitud por lo que da un ajuste peor de los parámetros K y C que este último.

Contrastes de Ajuste

Llamaremos contrastes de ajuste, a los que se efectúan sobre la forma de la distribución supuestamente generadora de los datos. Los dos contrastes básicos de ajuste son el contraste χ^2 de Pearson y el de Kolmogorov-Smirnov. El primero compara las frecuencias observadas con las especificadas por el modelo y es válido para distribuciones discretas o continuas. El segundo mide la distancia entre la función de distribución empírica y la teórica y sólo es válido para variables continuas.

El contraste χ^2 de Pearson.

Sea una variable aleatoria discreta con valores posibles x_1, x_2, \dots, x_k . Supongamos que en una muestra de tamaño n se han observado estos posibles valores con frecuencias O_1, O_2, \dots, O_k , donde $\sum O_i = n$. Sean p_1, p_2, \dots, p_k las probabilidades que les asigna el modelo supuesto, $\sum p_i = 1$, y llamaremos E_1, E_2, \dots, E_k , donde $E_i = np_i$, a las frecuencias esperadas si el modelo es correcto. Entonces, la variable:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

se distribuye aproximadamente como una χ^2 . Cuando el modelo es correcto sus grados de libertad son:

- Si el modelo especifica completamente las probabilidades p_i que son conocidas antes de tomar la muestra, el número de grados de libertad será **$k-1$** .
- Si las probabilidades p_i se han calculado estimando r parámetros del modelo por máxima verosimilitud, el número de grados de libertad es **$k-r-1$** .

Para una variable continua agruparemos los datos muestrales en clases que cubran todo el recorrido de la variable (las clases extremas serán, en general, abiertas). Sean O_1, \dots, O_k las frecuencias observadas. Calcularemos las probabilidades que el modelo asigna a estas clases, p_1, \dots, p_k y las frecuencias esperadas E_i . Si el número de clases es al menos cinco y la frecuencia esperada en cada una de ellas es al menos tres, la variable X^2 anterior sigue, en este caso, asintóticamente una distribución χ^2 , calculándose los grados de libertad como en el caso anterior.

Rechazaremos el modelo cuando la probabilidad de obtener una discrepancia mayor o igual que la observada sea suficientemente baja. Es decir, cuando:

$$X^2 \geq \chi_{\alpha}^2(k - r - 1)$$

para un cierto α pequeño.

El contraste Kolmogorov-Smirnov.

El contraste Kolmogorov-Smirnov calcula la distancia máxima entre la función de distribución empírica de la muestra y la teórica. Sea x_1, x_2, \dots, x_n la muestra ordenada, de manera que:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$$

La función de distribución empírica de la muestra, $F_n(x)$, se calcula:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0 & x \leq x_1 \\ \frac{r}{n} & x_r \leq x \leq x_{r+1} \\ 1 & x \geq x_n \end{cases}$$

Para contrastar la hipótesis de que el modelo generador de los datos es $F(x)$ se calcula el estadístico:

$$D_n = \max |F_n(x) - F(x)|$$

cuya distribución, cuando $F(x)$ es cierta, se ha tabulado. Si la distancia calculada D_n es mayor que la encontrada en las tablas, fijado α , rechazaremos el modelo $F(x)$.

3.2.3. Estudio de Calmas y Rachas

Es interesante determinar el número de horas en que la velocidad del viento se encuentra por debajo de un cierto valor umbral, velocidad de calma, que puede coincidir con la velocidad de arranque de un determinado aerogenerador. Para ello se estudia la evolución de las calmas en un período determinado de tiempo, recogiendo los resultados en una tabla o diagrama.

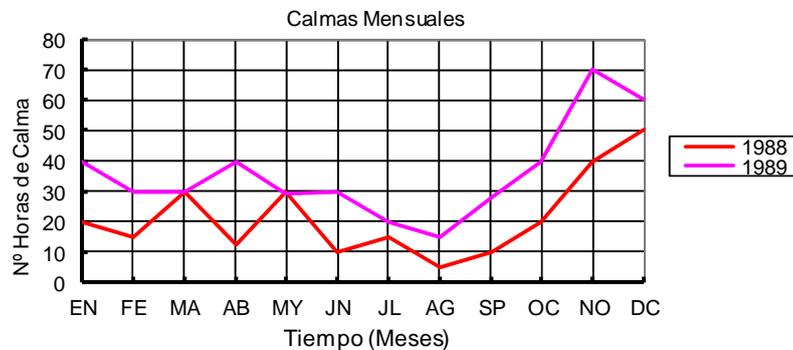


Figura. 3.13 Gráfica de calmas mensuales

Del mismo modo también interesa conocer cuáles han sido las rachas máximas mensuales del período en estudio.

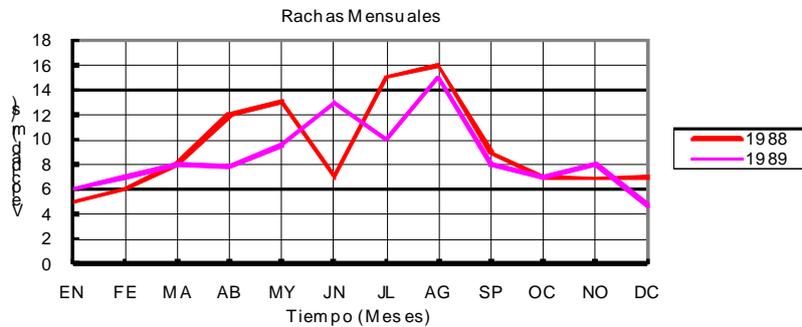


Figura. 3.14 Gráfica de rachas mensuales

3.2.4. Estudio de Direcciones.

Al igual que es imprescindible conocer los valores de la velocidad del viento, también es importante determinar el comportamiento direccional del mismo (Carta et al,2008a; Carta et al,2008b).

La forma más usual de representar los datos de dirección del viento en un período determinado es mediante una *rosa de frecuencias*. En este diagrama circular se representan las frecuencias de las distintas direcciones registradas.

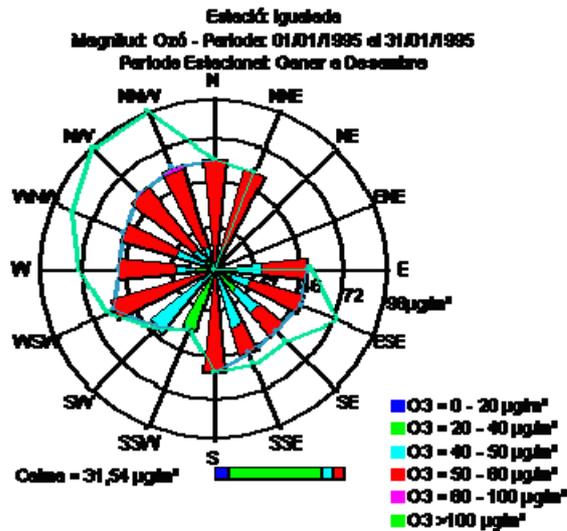


Figura. 3.15 Rosa de frecuencias.

A la vez también es interesante representar los porcentajes de los distintos intervalos de intensidad de viento que actúan en cada una de las direcciones (Carta et al,2009).

3.3 Simulación de los Regímenes de Viento

Se suele presentar a la hora de procesar los datos eólicos, el problema de la carencia de información durante determinados períodos. Para salvar este obstáculo se suele recurrir a la utilización de datos de aquellos observatorios que posean series históricas aceptables, tratando de encontrar, mediante un tratamiento estadístico apropiado, la información necesaria para estimar el comportamiento medio del viento en los lugares en que sólo se disponga de series cortas de datos. Estos tratamientos estadísticos se basan en la existencia de una alta relación entre los datos de la estación patrón y la candidata, por lo que previamente a la aplicación de los mismos se precisará confirmar el nivel de relación mediante la determinación del coeficiente de correlación.

Barros y Estevan (1983) proponen un método para estimar la velocidad media anual del viento basándose en períodos de medida de dos o tres meses. Este se basa en la minimización de los cuadrados de los errores entre los datos observados y una representación por medio de funciones ortogonales empíricas. Estas funciones son calculadas desde una matriz formada por series de datos de velocidad del viento de estaciones pertenecientes a la misma región. El método usa información de varias lugares de la región, por lo que se le denomina MCRT (Múltiple Climatic Reduction Technique).

La técnica en esencia es la siguiente:

Sea $[V_{ij}]$ una matriz cuyas columnas están compuestas por M series de datos de distintas estaciones de la región de estudio y sus R filas por los elementos (medias, desviaciones, etc.) de dichas series. Podemos escribir $[V_{ij}]$ como:

$$[V_{ij}] = [A_{ik}] [W_{kj}]$$

donde

$[A_{ik}]$ es una matriz ortogonal formada por los elementos de $[V_{ij}]$ $[V_{ji}]$ y $[W_{kj}]$ una matriz apropiada.

La expresión matricial anterior es equivalente a decir que el elemento y de la serie j puede escribirse:

$$V_{ij} = \sum_{k=1}^R a_{ik} W_{kj} \quad i = 1, \dots, R, \quad j = 1, \dots, M$$

Si las series, como puede esperarse para muchas velocidades de una misma región, no son todas independientes, una representación razonablemente precisa puede llevarse a cabo mediante:

$$V_{ij} = \sum_{k=1}^N a_{ik} W_{kj} \quad i = 1, \dots, R, \quad j = 1, \dots, M$$

donde $N < R$. La diferencia entre el valor verdadero y su representación por esta última expresión es un cierto valor ϵ_{ij} .

El valor de N es generalmente elegido de tal manera que la expresión conserve un importante porcentaje de elementos de la matriz A .

La técnica que aplica Barros considera el caso de que en una estación particular ($j=q$) sólo se posea un corto período de datos V_{iq} con $i = L \dots P$, donde $L \geq 1$ y $P < R$.

En tal caso, V_{iq} puede ser expresada por la última expresión ya que su valor no se ha usado para el cálculo de los elementos de la matriz A .

Los valores de W_{kq} se determinan minimizando la suma de los cuadrados de los errores.

$$\sum_{i=L}^P \epsilon_{iq}^2$$

Esto conduce a un sistema de N ecuaciones con N incógnitas W_{kq} , $k = 1 \dots N$, las cuales permiten extender la serie V_{iq} desde $i = L \dots P$ a $i = 1 \dots R$.

En la aplicación desarrollada los elementos de la matriz $[V_{ij}]$ se refieren velocidades medias y varianzas diarias.

Aplicando las expresiones desarrolladas llegamos a un sistema de ecuaciones de la forma:

$$[B_i] = [C_{ij}] [W_j]$$

donde $i=1, \dots, N$. $j=1, \dots, N$

Los coeficientes de este sistema, como se ha señalado, se han obtenido por minimización del error cuadrático medio, llegando a las expresiones:

$$B_i = \sum_{k=1}^P V_k \cdot A_{ki} \quad C_{ij} = \sum_{k=1}^P A_{ki} \cdot A_{kj}$$

Con estos coeficientes obtenemos los términos de la matriz $[W_j]$ mediante los cuales obtenemos determinamos los valores las velocidades medias y varianzas diarias para la estación q determinada.

Con los valores de las velocidades medias diarias determinamos las velocidades medias mensuales.

Para la estimación de las varianzas mensuales para cada uno de los meses debemos emplear la siguiente expresión:

$$\sigma_{mens}^2 = \frac{n_k \cdot m_k - n_k}{n_k \cdot m_k - m_k} \cdot A + \frac{n_k - m_k}{n_k - 1} \cdot B$$

Siendo:

$$A = \frac{\sum_1^{ndías} (V_{diar} - V_{mens})^2}{ndías - 1} \quad B = \frac{\sum_1^{ndías} \sigma_{diaris}^2}{ndías}$$

$n_k = ndías \times 24 = n^\circ$ de datos de la serie inicial (horas)

$m_k = ndías = n^\circ$ de datos de la serie inicial (días)

Posteriormente, otros autores han propuesto modelos de predicción basados en redes bayesianas (Carta et al,2011) y en redes neuronales (Velázquez et al,2011), los cuales tienen en cuenta la velocidad y dirección del viento de múltiples estaciones de referencia.

3.3.1. Estimación de velocidades medias periódicas. Método de los ratios.

Se pretende determinar mediante la utilización de este método, las velocidades medias mensuales periódicas correspondientes a un intervalo de años para una estación determinada. Para ello debemos contar con los datos mensuales del período en estudio correspondientes a una estación de apoyo seleccionada.

Partiremos, además, del conocimiento de las medias mensuales en un año base tanto de la estación de estudio como de la de apoyo.

Sean las velocidades medias mensuales del período de la estación de apoyo:

$$\left\{ \begin{array}{cccc} V_{A11} & V_{A12} & \dots & V_{A1N} \\ V_{A21} & V_{A22} & \dots & V_{A23} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ V_{A121} & V_{A122} & \dots & V_{A12N} \end{array} \right\}$$

Mediante los valores anteriores podremos determinar las medias mensuales periódicas del intervalo.

$$\bar{V}_{1A}, \bar{V}_{2A}, \dots, \bar{V}_{12A}$$

Partiendo del conocimiento de las medias mensuales de las dos estaciones para un año base:

$$V_{1A}, V_{2A}, \dots, V_{12A}$$

$$V_{1B}, V_{2B}, \dots, V_{12B}$$

Podremos calcular las medias periódicas de la estación en estudio B a partir de la relación.

$$\frac{\overline{V_{iA}}}{V_{iA}} = \frac{\overline{V_{iB}}}{V_{iB}}$$

Debemos reseñar que el nivel de aproximación de los resultados dependerá del grado de correlación existente entre las dos estaciones, por lo que será necesario realizar un análisis previo con los datos reales disponibles.

3.4 Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica

3.4.1 Determinación de la energía producida por un aerogenerador

La determinación de la energía eléctrica producida por un aerogenerador de curva potencia-velocidad $P(v)$ inmerso en un determinado régimen de vientos puede llevarse a cabo mediante tres procedimientos diferentes (Carta et al, 2008c).

3.4.1.1. Método estático.

La curva de probabilidad de velocidades de viento del lugar (que da la probabilidad de ocurrencia, o también, el porcentaje estimado de tiempo para cada intervalo de velocidad) se acopla (Figura. 3.27) con la curva de funcionamiento (que da la potencia suministrada para cada intervalo de velocidad, es decir, la potencia en función de la velocidad del viento, $P=P(v)$) de un aerogenerador, y se obtiene la curva de probabilidad de potencia, cuya integral (III.20) da como resultado la producción energética estimada para el periodo considerado.

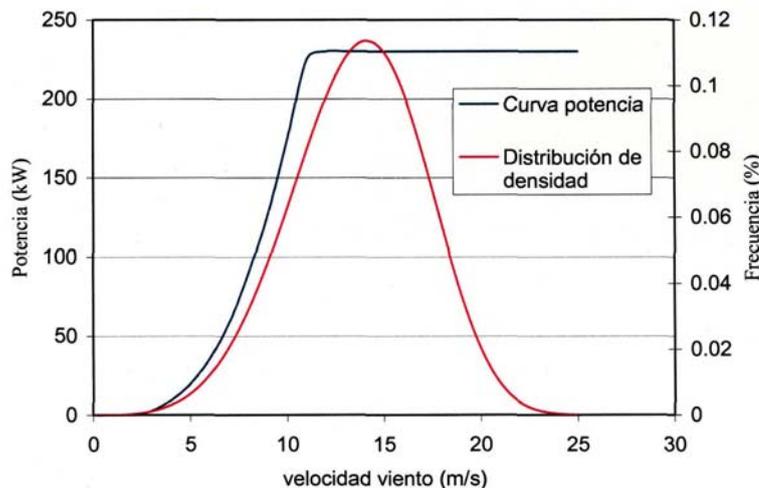


Figura. 3.16 Acoplamiento curva de potencia-distribución de densidad de probabilidad

$$\bar{P} = \int_{V_a}^{V_P} P(v)f(v)dv$$

En el caso de la distribución de Weibull de dos parámetros, la potencia media vendrá dada por:

$$\bar{P} = \int_{V_a}^{V_p} P(v) \left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \right] dv$$

Algunos autores utilizan curvas de potencia-velocidad idealizadas (Koepl,1982; Lysen, 1983; Jones, 1986; Jones, 1988) con formas lineales, cuadráticas, cúbicas, incluso de más alta potencia o combinación de éstas. Sin embargo, ya que los fabricantes de aerogeneradores proporcionan de forma discretizada (en N puntos) la curva de potencia velocidad de sus máquinas es posible utilizarlas en la ecuación anterior si se realiza una aproximación. Dicha aproximación consiste en suponer lineal la variación entre dos puntos de la curva de potencia-velocidad. Se tendrá pues que dados dos puntos "i" e "i+1", la expresión de la potencia en este intervalo, en función de la velocidad, podrá ser escrita como:

$$P(v) = \frac{P_{i+1} - P_i}{V_{i+1} - V_i} (v - v_i) + P_i$$

Luego, si se utiliza como función de distribución la función de Weibull, la expresión de la potencia media podrá ser calculada de la siguiente forma:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{N-1} \left\{ \int_{v_i}^{v_{i+1}} \left[\frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) \right] \left[\frac{P_{i+1} - P_i}{V_{i+1} - V_i} (v - v_i) + P_i \right] dv \right\}$$

Realizando operaciones y denominando:

$$\delta = \frac{P_{i+1} - P_i}{V_{i+1} - V_i}$$

$$I_1 = \int_{v_i}^{v_{i+1}} \left(\frac{v}{c} \right)^k \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) dv$$

$$I_2 = \int_{v_i}^{v_{i+1}} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right) dv$$

Se obtiene como expresión final de la potencia media generada en el periodo considerado:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^{N-1} \left[\delta k I_1 + (P_i - \delta v_i) \left(\frac{k}{c} \right) I_2 \right]$$

La estimación de la energía producida se realiza mediante:

$$\bar{E} = T \bar{P}$$

donde T es el periodo de tiempo considerado.

La ventaja de este método es su simplicidad y que puede utilizarse para hacer una estimación global de la energía producida, así como para analizar su sensibilidad frente a diversos parámetros de interés, como por ejemplo, las velocidades características de funcionamiento del aerogenerador.

La desventaja de este método es que ignora efectos no estacionarios, periodos de mantenimiento, etc.

3.4.1.2. Método cuasidinámico.

Una serie temporal de valores de viento se compara con la curva de funcionamiento de un aerogenerador para obtener una serie temporal de la potencia eléctrica suministrada, a partir de la cual se puede determinar la potencia y energía media del periodo utilizando los n datos de viento (Carta,2010).

La ventaja de este método es que se puede proporcionar información acerca de los arranques y paradas experimentados por el aerogenerador.

La desventaja radica en la nula información que aporta respecto al comportamiento en periodos transitorios.

3.4.1.3. Método dinámico.

Utiliza una serie temporal de datos de viento como entrada a un modelo numérico de funcionamiento de la aeroturbina. De este modo pueden llevarse a cabo investigaciones sobre el efecto de diversas opciones o cambios en la estrategia de control de la aeroturbina (Carta,2010).

Análisis y Simulación de la Energía Eléctrica de Origen Fotovoltaico

4.1 Introducción

El objetivo específico de este capítulo de la tesis es, como su título indica, el de analizar la capacidad de accionamiento de la planta de desalinización mediante energía fotovoltaica, los cálculos utilizados para simular un sistema fotovoltaico y de cuál será el modelo para dimensionar este tipo de sistemas.

Para dimensionar un sistema fotovoltaico es necesario conocer algunas características de los elementos que lo componen. Un sistema fotovoltaico básico se compone de un generador, constituido por una serie de módulos fotovoltaicos (FV) interconectados entre sí, un sistema de almacenamiento de energía a base de baterías y un convertidor DC/AC o DC/DC. (Carta et al,2010; Boxwell,2011;Camacho et al, 2010)

Pueden utilizarse formas de dimensionado, basadas en la relación entre la potencia nominal generada por un módulo fotovoltaico, y la capacidad acumulada por sus baterías. Ésta es la base de una forma muy común de dimensionado de un sistema fotovoltaico, conocida como dimensionado basado en la probabilidad de pérdida de carga (LLP). Este método se utiliza frecuentemente debido a la facilidad de cálculo. Si embargo, existen varias razones que impulsan a no utilizar esta forma de dimensionado, ya que entre otras razones cabe la posibilidad de no utilizar el almacenamiento en baterías, lo que imposibilitaría las bases del dimensionado bajo LLP.

Otra forma de realizar el dimensionado del sistema fotovoltaico es a partir de la simulación completa del sistema (Krauter, 2010), para lo que es necesario utilizar modelos en cada etapa del mismo, es decir: modelado del clima, modelado de los módulos fotovoltaicos, modelado de las pérdidas del generador fotovoltaico (grupo de módulos FV) y modelado del convertidor DC/AC.

Con los modelos utilizados, los datos climáticos reales y las características eléctricas de los módulos FV y convertidores DC/AC será posible obtener la potencia de salida AC en bornas del convertidor.

4.2 Modelado del clima.

4.2.1 Introducción.

Un módulo fotovoltaico produce electricidad a partir de la radiación solar. A mayor radiación, mayor es la potencia generada por una célula solar.

La temperatura influye sobre la producción energética de un módulo fotovoltaico dado que a medida que la temperatura aumenta, disminuye la tensión de circuito abierto, repercutiendo así en una disminución de la tensión de salida, y por tanto, de la potencia generada.

4.2.1.1 Modelado de la radiación solar.

Los modelos de radiación solar, conjugan la utilización de cálculos astronómicos y observaciones meteorológicas. Para ello es necesario conocer la posición del sol en la bóveda celeste y las horas en que se produce el Orto y Ocaso, así como tener una base de datos de años de observaciones y medidas de radiación solar para, con el uso de modelos experimentales poder predecir la radiación en un período en un determinado lugar (Carta et al,2010; Markvart,2008; Twidell y Weir,2000).

La energía de radiación solar incidente en una superficie a lo largo de un cierto período de tiempo por unidad de superficie se conoce como irradiación (kWh/m^2), mientras que a la densidad de potencia incidente en una superficie se le da el nombre de irradiancia (kW/m^2).

La elección de una escala de tratamiento horaria (cálculos para una hora) permite abordar el problema de una forma más fácil y comprensible, ya que conseguimos que la irradiación a lo largo de una hora coincida numéricamente con la irradiancia media durante ese mismo intervalo de tiempo. Y además, suponer que coincide con la irradiancia en el instante central de esa misma hora evita la realización de integrales en el dominio del tiempo sin llevarnos a errores apreciables. Así, se eligen aquellos modelos que utilizan datos horarios de irradiación medidos por sensores para una determinada localización.

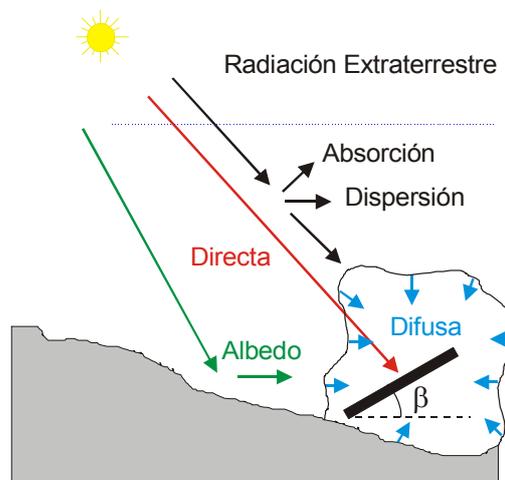


Figura 4.1 Componentes de la radiación

El objetivo de los modelos de radiación solar es obtener la irradiancia efectiva que incide sobre la superficie de los módulos fotovoltaicos, dato fundamental para conocer la potencia generada por estos. La irradiancia incidente sobre cualquier superficie depende de la orientación de la misma con respecto al sol, es decir la inclinación del panel con respecto a la horizontal y la orientación este-oeste del mismo (véase figura 4.2). Además, la radiación solar varía según la hora del día en función de la posición del sol en la bóveda celeste debido a la variación de la masa de aire (AM) interpuesta entre el sol y la superficie.

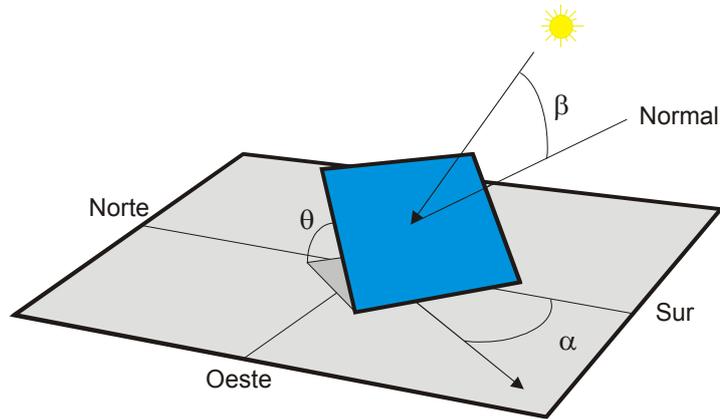


Figura 4.2. Irradiancia incidente

Es común a todos los modelos de radiación solar el tratamiento de la misma previa separación de la radiación en tres componentes de distinta naturaleza (figura 4.1):

- Radiación directa, debida a los haces de rayos solares recibidos en línea recta con el sol.
- Radiación difusa, procedente de todo el cielo excluyendo el disco solar y debido a los rayos no directos y dispersados por la atmósfera en la dirección del receptor.
- Radiación del albedo, procedente del suelo y debida a la reflexión de la radiación incidente sobre él.

La radiación total, denominada radiación global, es la suma de las anteriores.

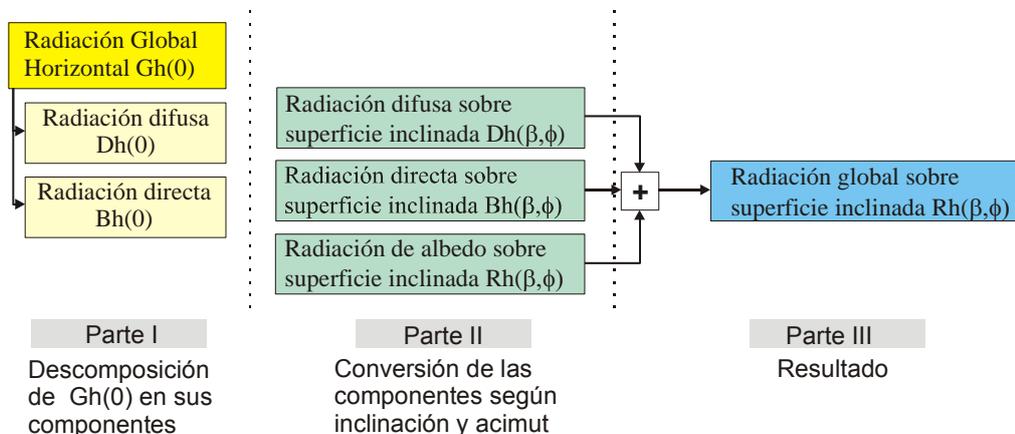


Figura 4.3 Determinación de la radiación global

En la figura 4.3 se muestra el proceso a seguir para determinar la radiación global sobre una superficie arbitrariamente orientada.

Como dato de partida tenemos la irradiancia global horaria $G_h(0)$, esta irradiancia como hemos dicho tiene tres componentes: directa, difusa y albedo, debe de calcularse para la superficie inclinada para lo cual, mediante diferentes modelos obtendremos estas componentes para superficie horizontal y posteriormente la modificaremos para superficie inclinada.

4.2.1.2 Descomposición de la radiación global horizontal en sus componentes.

4.2.1.2.1 Irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal.

El conocer la irradiación incidente sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera es, con mucha frecuencia, necesario para calcular los valores de las diferentes componentes de la radiación sobre un receptor terrestre.

Consideraciones puramente geométricas, permiten obtener expresiones para diferentes períodos de tiempo. Para la irradiación a lo largo de una hora resulta:

$$Boh(0) = Bo * \varepsilon_0 * \cos \theta_{zs}$$

donde θ_{zs} es la distancia cenital correspondiente al instante central de esa hora en particular, ε_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la eclíptica y Bo es la constante solar.

4.2.1.2.1.1 Valor de la constante Bo

El valor de esta constante fue establecida por Hickey y Crommelynck a finales de los años 70 con un valor entre 1,363 y 1,371 W/m^2 . Se tomará que la constante solar tiene el valor de 1,367 W/m^2 .

4.2.1.2.1.2. Factor de corrección de la excentricidad de la eclíptica ε_0 y declinación solar (δ)

La tierra da vueltas alrededor del Sol escribiendo una órbita elíptica en la que el Sol ocupa uno de los focos. El plano que contiene a ésta órbita se llama plano de la eclíptica y el tiempo que tarda en recorrerla define un año.

A su vez, la Tierra rota a un ritmo de una vuelta por día y alrededor de un eje central conocido como eje polar. Este eje polar, a su vez, gira alrededor de la normal al plano de la eclíptica y de tal forma que el ángulo que forma con ella es constante e igual a $23,45^\circ$. Ello hace que el ángulo formado por el plano del ecuador con la recta que pasa por los centros del sol y la tierra, este cambiando incesantemente. Este ángulo se conoce con el nombre de declinación solar, (δ) y para nuestro propósito puede ser considerado constante a lo largo de un día particular. De hecho, la máxima variación de (δ) en 24 horas es inferior a $0,5^\circ$.

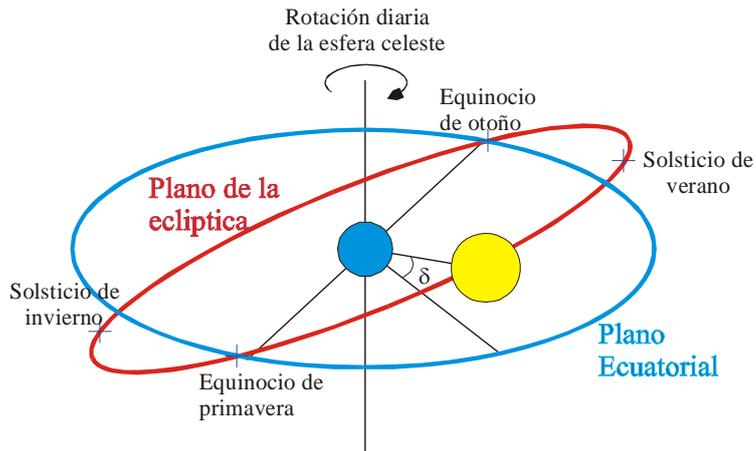


Figura 4.4 Parámetros astronómicos

Una expresión que permite calcular δ , en grados, con una exactitud suficiente, considerando que la tierra gira alrededor del sol con una velocidad constante es:

$$\delta(^{\circ}) = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{365} (dh + 284) \right]$$

siendo dh el número de orden del día dentro del año.

Debido a la ligera excentricidad de la eclíptica, la distancia entre el sol y la tierra varía a lo largo del año. Haciendo la misma simplificación anterior, podemos asegurar que el valor de la excentricidad de la eclíptica obedece a la expresión:

$$\varepsilon_0(^{\circ}) = 1 + 0.033 * \cos \frac{360}{365} * dh$$

4.2.1.2.1.3 Cálculo de la distancia cenital (θ_{zs}).

El coseno de la distancia cenital del sol también debe ser calculado, y depende de diversos factores astronómicos como son la latitud (ϕ), tiempo solar verdadero (ω) y declinación solar (δ)

$$\cos \theta_{zs} = \sin \delta * \sin \phi + \cos \phi * \cos \omega$$

El tiempo solar verdadero, difiere en 12 horas aproximadamente del tiempo oficial, ya que es 0 a mediodía de cada día, negativo por la mañana y positivo por la tarde (figura 4.5).

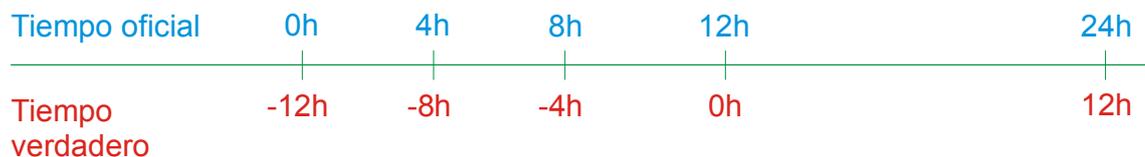


Figura 4.5 Tiempo oficial y solar verdadero

El tiempo solar verdadero se relaciona con el tiempo solar del lugar (TO) mediante la expresión:

$$\omega(\text{horas}) = TO - 12 + ET - AO - \frac{LL - LH}{15}$$

donde:

- TO: tiempo oficial del lugar (horas).
- AO: adelanto oficial sobre el uso horario (horas).
- LL: longitud local (°)
- LH: Longitud del meridiano origen del uso horario correspondiente (°). Es positiva si está hacia el Oeste de Greenwich y negativa hacia el Este.
- ET: ecuación del tiempo.

La ecuación del tiempo, en minutos, obedece a la siguiente expresión:

$$ET = 2.2918 * (-0.0075 + 0.1868 * \cos \Gamma - 3.2077 * \sin \Gamma - 1.4615 * \cos 2\Gamma - 4.089 * \sin 2\Gamma)$$

siendo:

$$\Gamma(\text{rad}) = 2\pi \frac{dh - 1}{365} \quad (\text{dh: día del año entre 1 y 365})$$

4.2.1.2.1.4 Cálculo de la componente difusa de la radiación sobre superficie horizontal Dh(0).

La determinación de las componentes directa y difusa de la radiación global sobre superficies horizontales es importante en muchas áreas de la energía solar, especialmente en la estimación de la radiación sobre superficies inclinadas a partir de los valores de radiación horizontal. Esto se debe a que, en la mayoría de las estaciones meteorológicas, la única variable medida es la radiación global horizontal, y a que la trasposición de estos valores a superficies inclinadas exige trabajar con cada una de estas componentes por separado.

Para realizar los cálculos con radiación solar se acostumbra a normalizar los datos de radiación en superficies terrestres respecto a la radiación extraterrestre. De este modo se obtiene una nueva variable indicativa de la transparencia de la atmósfera denominada índice de claridad K_t , definido en el caso de la radiación global como:

$$K_t = \frac{Gh(0)}{Boh(0)}$$

y en el caso de la radiación difusa, normalizada respecto de la global:

$$K_d = \frac{Dh(0)}{Goh(0)}$$

Vamos a aplicar una fórmula de correlación estadística para predecir la fracción de radiación difusa respecto a la radiación global. Existe una gran variedad de correlaciones con un grado de predicción limitado, obtenidas siempre en base a las observaciones sobre un determinado lugar. Vamos a utilizar la fórmula de correlación horaria utilizada por Macagnan (1993):

$$\begin{aligned} K_t < 0.2 & \quad K_d = 0.996 + 0.0424K_t - 0.586K_t^2 \\ 0.2 \leq K_t < 0.7 & \quad K_d = 1.11 - 0.203K_t - 2.52K_t^2 + 0.617K_t^3 + 1.063K_t^4 \\ 0.7 \leq K_t & \quad K_d = -0.0169 - 0.99K_t + 1.63K_t^2 \end{aligned}$$

Partiendo del conocimiento de $G_h(0)$, obtenido de las estaciones meteorológicas, podemos obtener K_t , y con este valor obtener K_d con lo que conocemos $D_h(0)$.

4.2.1.2.1.5 Cálculo de la componente directa de la radiación sobre superficie horizontal $B_h(0)$.

La componente directa de la radiación sobre superficie horizontal $B_h(0)$ se obtiene restando de la radiación global $G_h(0)$ el valor de la radiación difusa $D_h(0)$.

$$B_h(0) = G_h(0) - D_h(0)$$

4.2.1.2.2 Cálculo de las componentes de radiación global para superficies inclinadas.

4.2.1.2.2.1 Radiación directa sobre superficies inclinadas $B()$.

La radiación directa sobre superficies inclinadas puede calcularse teniendo en cuenta que es igual a la radiación directa sobre superficie horizontal, multiplicada por el cociente entre las radiaciones extraterrestres sobre superficie inclinada y horizontal, esto puede expresarse como:

$$B(\alpha, \beta) = B(\alpha, 0) \frac{\cos \beta}{\cos \theta_{zs}}$$

4.2.1.2.2.2 Radiación difusa sobre superficies inclinadas $D()$.

Existen dos tipos de modelos para la descripción de la radiación difusa sobre superficies inclinadas: los modelos no direccionales y los modelos direccionales. Los modelos no direccionales, empíricamente determinados a partir de medidas obtenidas con sensores planos, no dan ninguna información de la existencia de gradientes en el hemisferio del cielo. Los modelos direccionales se determinan también empíricamente a partir de medidas de la irradiancia en varias posiciones del cielo, obtenidas con instrumentos con un ángulo de visión reducido. Estos modelos son aplicables para valores horarios y para valores diarios. A continuación se dan las expresiones para estos modelos y valores horarios.

4.2.1.2.2.3 Modelo de Liu y Jordan (1961)

Es un modelo isotrópico que considera que la radiación difusa que emana del cielo está uniformemente distribuida, de forma que:

$$D(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} D(0)(1 + \cos \beta)$$

4.2.1.2.2.4 Modelo de Temps y Coulson (1977)

$$D(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} D(0)(1 + \cos \beta) \left[\left(1 + \operatorname{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left(1 + \cos^2 \theta_s \sin^3 \theta_{zs} \right) \right]$$

4.2.1.2.2.5 Modelo de Klucher (1979)

$$D(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} D(0)(1 + \cos \beta) \left[\left(1 + F \operatorname{sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \left(1 + F \cos^2 \theta_s \sin^3 \theta_{zs} \right) \right]$$

$$F = 1 - \left(\frac{D(0)}{G(0)} \right)^2$$

4.2.1.2.2.6 Modelo de Hay y Davies (1978).

Este modelo considera dos zonas en el cielo como fuentes de radiación difusa: una parte emitiendo isotrópicamente y otra, la parte circumsolar, emitiendo direccionalmente:

$$D(\alpha, \beta) = D(0) \left(\frac{G(0) - D(0)}{B_0(0)} \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{G(0) - D(0)}{B_0(0)} \right) \right)$$

4.2.1.2.2.7 Modelo de Pérez y Stewart (1984).

Este modelo considera tres zonas del cielo como fuentes diferentes de radiación difusa (Figura 4.6): una región circumsolar, una banda horizontal y el resto del hemisferio celeste, abarcando cada región una cierta extensión angular.

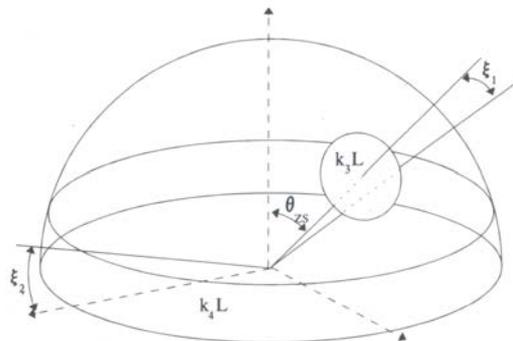


Figura 4.6 Zonas como fuente de radiación difusa

Las ecuaciones que permiten el cálculo de la irradiancia difusa por este modelo son:

$$D(\alpha, \beta) = D(0) \left[\frac{1}{2} (1 + \cos \beta) (1 - F_1) + F_1 \frac{\cos \theta_s}{\cos \theta_{zs}} + F_2 \sin \beta \right]$$

$$\begin{cases} F_1 = F_{11} + F_{12} \Delta + F_{13} \theta_{zs} \\ F_2 = F_{21} + F_{22} \Delta + F_{23} \theta_{zs} \end{cases}$$

$$\Delta = \frac{D(0)m}{B_{0n}} \quad \varepsilon = \frac{D(0) + B}{D(0)} \quad B = \frac{B(0)}{\cos \theta_{zs}}$$

$$m = \left[\cos \theta_{zs} + 0,50572(96,07995 - \theta_{zs})^{-1,6364} \right]^{-1}$$

Los coeficientes $F_{11,12,13,21,22,23}$ se pueden ver en la tabla 4.1:

Intervalo	ε_{\min}	ε_{\max}	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	1,000	1.056	-0,042	0,550	-0,044	-0,120	0,138	-0,034
2	1.056	1,253	0,261	0,559	-0,243	-0,019	0,083	-0,081
3	1,253	1,586	0,481	0,460	-0,354	0,077	0,006	-0,116
4	1,586	2,134	0,825	0,187	-0,532	0,172	-0,050	-0,151
5	2,134	3,230	1,102	-0,229	-0,586	0,350	-0,398	-0,171
6	3,230	5,980	1,226	-0,451	-0,617	-0,444	-0,949	-0,073
7	5,980	10,080	1,367	-0,838	-0,655	0,431	-1,750	0,094
8	10,080	-----	0,978	-0,812	-0,393	0,335	-2,160	0,186

Tabla 4.1: Coeficientes para el modelo de Pérez puntual.

4.2.1.2.2.8 Radiación de albedo R().

Cuando la superficie captadora forma un ángulo distinto de cero con la horizontal, es necesario incluir en el cálculo de la radiación incidente la radiación reflejada (o de albedo) por el entorno. Se puede utilizar la aproximación de que el suelo refleja isotrópicamente toda la radiación que recibe, debido a que la contribución de la irradiancia de albedo a la irradiancia global es generalmente baja. De este modo la irradiación de albedo se puede calcular mediante:

$$R(\alpha, \beta) = \frac{1}{2} \rho G(0) (1 - \cos \beta)$$

donde r es la reflectividad del suelo y en ausencia de información particularizada, se considera como 0,2.

4.2.1.3 Radiación Global sobre superficies inclinadas G().

La radiación global incidente sobre una superficie inclinada (ver figura 2.2) en la superficie terrestre se puede calcular como la suma de tres componentes: la componente directa, la componente difusa y la componente reflejada:

$$G()=B()+D()+R()$$

A la radiación resultante es posible aplicar un factor de corrección para contemplar la pérdida de radiación solar debido al ángulo de incidencia sobre el módulo. Dicha pérdida tiene que ver con la reflexión de parte de la luz al atravesar el vidrio que cubre los módulos FV, la posible suciedad de los mismos y la disminución de la eficiencia en condiciones de baja irradiancia. Si esta corrección se lleva a cabo, la fórmula anterior sería sustituida por:

$$G()=0,856*B()+F_T(\theta_s)*D()+8,856*R()$$

Donde:

$$F_T(\theta_s) = 1 - 0,0663\theta_s^2 + 0,0882\theta_s^3 + 0,194\theta_s^4$$

4.2.2 Modelado de la temperatura.

Al contrario que los datos de irradiación medidos entre hora y hora, los datos disponibles de temperatura son diarios, consistentes en una temperatura máxima T_{aM} y una mínima T_{am} . Existe un modelo sencillo que se ajusta bien a los valores experimentales; se obtiene observando que la temperatura a lo largo del día evoluciona de forma similar a la radiación global, pero con un retraso aproximado de dos horas. Este hecho permite establecer tres supuestos:

1. T_{aM} ocurre siempre dos horas después del mediodía ($\omega=30^\circ$).
2. T_{am} ocurre siempre al amanecer (ω_s)
3. Entre estos dos instantes, la temperatura ambiente evoluciona según dos semiciclos de dos funciones coseno. Una entre el amanecer y el mediodía y otra entre el mediodía y el amanecer del día siguiente.

Un conjunto de ecuaciones, acorde con estos supuestos, que permite calcular la temperatura ambiente a lo largo de un día j , es el siguiente:

Para $-\pi < \omega < \omega_s$:

$$T_a = T_{aM}(j-1) - (T_{aM}(j-1) - T_{am}(j)) \left[\frac{1 + \cos(a\omega + b)}{2} \right]$$

$$a = \frac{\pi}{\left(\frac{\pi}{6} - \omega_s - 2\pi \right)}$$

$$b = -a\omega_s$$

Para $\omega_s < \omega < \pi/6$

$$T_a = T_{am}(j) + (T_{aM}(j) - T_{am}(j)) \left[\frac{1 + \cos(a\omega + b)}{2} \right]$$

$$a = \frac{\pi}{\left(\omega_s - \frac{\pi}{6} \right)}$$

$$b = -a \frac{\pi}{6}$$

Para $\pi/6 < \omega < \pi$:

$$T_a = T_{aM}(j) - (T_{aM}(j) - T_{am}(j+1)) \left[\frac{1 + \cos(a\omega + b)}{2} \right]$$

$$a = \frac{\pi}{\left(2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6} \right)}$$

$$b = -\left(\pi + a \frac{\pi}{6} \right)$$

4.3 Modelado de los módulos fotovoltaicos.

Es posible obtener la potencia de salida de un módulo fotovoltaico si se conoce la corriente y la intensidad de salida del mismo. Suponiendo que los diodos de protección de cada módulo fijasen la tensión de trabajo, sólo falta conocer la intensidad generada cada hora según los datos climáticos del momento (Carta,2010).

La ecuación de un módulo fotovoltaico depende de numerosos factores intrínsecos del mismo. A su vez, algunos de estos factores se ven directamente influidos por la temperatura de las células fotovoltaicas que componen el módulo FV y por la radiación solar. Así, para calcular la potencia en cada hora es imprescindible conocer la irradiancia y temperatura en ese momento. La fórmula de cálculo de la intensidad es, por tanto, iterativa.

Cuatro fórmulas están implicadas en la relación entre la irradiancia y otros factores necesarios para calcular la potencia de salida. Las tres primeras son:

$$I_{sc}(G) = C_1 G$$

donde: $C_1 = I_{sc}(100 \text{ mW/cm}^2) / 100 \text{ mW/cm}^2$

$$T_c - T_a = C_2 G$$

donde: $C_2 = (T_{ONC} (\text{°C}) - 20) / 80 \text{ mW/cm}^2$ $T_a = \text{Temperatura ambiente}$

$$dV_{oc}/dT = -2,3 \text{ mV/°C}$$

La intensidad en cortocircuito (I_{sc}) y la temperatura de operación nominal de la célula (T_{ONC}) serán proporcionados por el fabricante, mientras que T_a se proporcionará como dato desde un archivo.

Las fórmulas anteriores ayudarán a obtener la potencia a la salida de un módulo fotovoltaico, a partir de la corriente generada a la salida del generador, I_G , y la tensión nominal impuesta por la configuración de ese módulo, V_G . La fórmula siguiente introduce ambos factores:

$$I_o = I_{SCG} [1 - \exp(- (V_G - V_{OCG} + I_G R_{SG}) / N_s V_t)]$$

donde:

- I_{SCG} es la corriente de saturación en cortocircuito del generador fotovoltaico.
- V_{OCG} es la tensión en circuito abierto del generador fotovoltaico. En principio, sería posible utilizar el valor nominal dado por fabricante. Sin embargo, más adelante se explica que este factor varía con la temperatura.
- $R_{SG} = R_s N_s / N_p$, es la resistencia serie del generador fotovoltaico. El número de células serie y paralelo viene dado por el fabricante, no así con R_s , que es la resistencia serie de una sola célula solar. R_s no depende de las condiciones particulares de operación, facilitando así los cálculos. N_s y N_p son, respectivamente, el número de células serie y paralelo del módulo fotovoltaico.

Hay que tener en cuenta además, que I_{SCG} , está implícito en la ecuación, por lo que se recurrirá a métodos iterativos en su fase de implementación.

A continuación se describe la secuencia de cálculos para obtener la potencia de salida.

4.3.1 Cálculo de la corriente de saturación en cortocircuito I_{SCG} .

A partir de la irradiación horaria sobre superficie inclinada, es posible obtener la corriente de saturación de cortocircuito. Al tratarse de irradiación entre hora y hora, la densidad de potencia, es decir, la irradiancia en W/m^2 tiene un valor que se supone coincide con el valor de irradiación.

4.3.2 Cálculo de la tensión en circuito abierto V_{OCG} .

Es preciso conocer previamente la temperatura de operación de la célula, T_c . Su valor se utilizará en la ecuación, que expresa la desviación de la V_{oc} nominal con la temperatura. La expresión de V_{ocr} , es la ecuación de una recta (véase la figura xxx) dada por la derivada de la ecuación:

$$dV_{oc}/dT = -2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

y uno de sus puntos, obtenido a partir de V_{oc} en condiciones nominales a la temperatura de medida (dato ofrecido por fabricante):

$$V_{oc} = V_{oc}(\text{nominal}) + dV_{oc}/dT_c * T_c$$

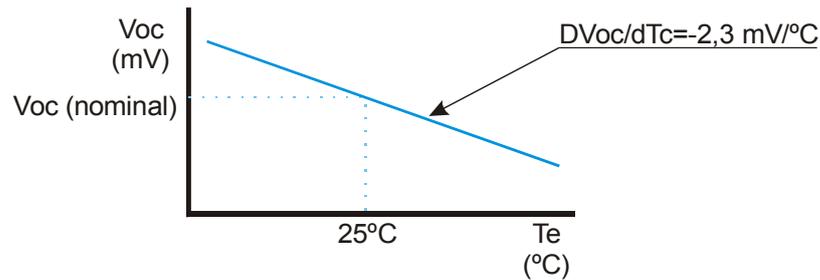


Figura 4.7 Tensión en circuito abierto

4.3.3 Cálculo de la resistencia serie R_{SG} .

La resistencia serie del generador fotovoltaico se obtiene mediante la expresión:

$$R_{SG} = \frac{R_S N_S}{N_P}$$

El proceso para definir el comportamiento de una célula fotovoltaica para obtener el valor de la resistencia serie de una célula (R_S) es el siguiente:

- * Cálculo de Potencia máxima de la célula:

$$P_{mc} = \frac{P_{mm}}{N_S N_P}$$

P_{mc} es la potencia máxima de la célula en vatios.

P_{mm} es la potencia máxima del módulo fotovoltaico en vatios.

- * Posteriormente se obtiene v_{oc} a partir de V_t

v_{oc} es la tensión de circuito abierto normalizada cuyo valor es:

$$v_{oc} = V_{oc} / V_t$$

donde, $V_t = mkT/e$, siendo m el factor de idealidad ($1 \leq m \leq 2$), k es la constante de Boltzmann, T la temperatura nominal en grados Kelvin (293K), y e la carga del electrón. Suele ser unos 25mV aproximadamente.

El paso previo para la obtención de la resistencia serie es el cálculo de la resistencia serie normalizada. El valor de dicha r_s es:

$$r_s = 1 - \frac{FF}{FF_0}$$

donde:

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{v_{oc} + 1}$$

$$FF = \frac{P_{\max \text{ célula}}}{V_{oc \text{ célula}} I_{sc \text{ célula}}}$$

La V_{oc} y la I_{sc} de las células se obtiene dividiendo el valor dado por fabricante por el número de células serie y paralelo, respectivamente.

*Cálculo de la resistencia serie:

$$R_s = r_s \left[\frac{V_{oc\text{célula}}}{I_{sc\text{célula}}} \right]$$

Sin embargo, este modelo de cálculo de R_s es válido sólo cuando $v_{oc} > 15$ voltios y $r_s < 0,40$.

4.3.4 Obtención de I_G utilizando métodos iterativos.

La ecuación:

$$I_G = I_{SCG} \left[1 - e^{\frac{V_G - V_{OCG} + I_G R_{SG}}{N_s V_t}} \right]$$

será el eje central del método iterativo. Si V_G se da como valor conocido, la I_G es la incógnita. El método iterativo es muy sencillo porque consiste en un bucle que realiza operaciones sucesivas con dicha ecuación. En la figura 4.8 se muestra un ejemplo de cómo se va realizando esta aproximación sucesiva al valor real.

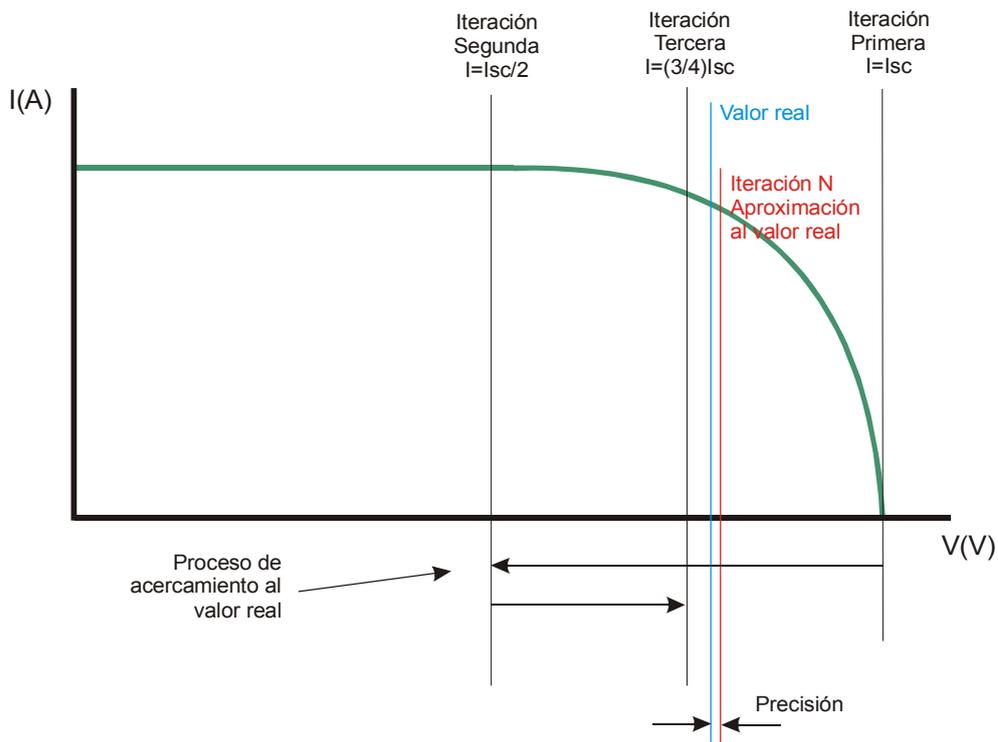


Figura 4.8 Obtención de I_G por métodos iterativos

La primera iteración ofrece un valor inicial de I_G , el cual se utiliza en el segundo miembro de la ecuación. Según la I_G resultante del primer miembro de la ecuación, se irá variando el valor de I_G hasta conseguir la precisión deseada.

4.3.5 Obtención de la potencia de salida.

La potencia de salida (en vatios) de los módulos fotovoltaicos se obtiene mediante:

$$P(W) = V_G I_G$$

4.4 Modelado de las pérdidas del generador fotovoltaico.

Se considera el generador fotovoltaico como el conjunto de todos los módulos fotovoltaicos asociados en serie y paralelo. Para hacer más real la potencia existente a la salida del generador fotovoltaico se aplican coeficientes de pérdidas porcentuales por interconexión, cableado y envejecimiento de módulos. Los dos primeros tipos de pérdidas se producen por efecto Joule en los conductores existentes tanto entre células fotovoltaicas como entre módulos fotovoltaicos.

Los valores típicos de pérdidas en esta aplicación son:

- Cableado de módulos: 1%
- Interconexión de módulos: 2%
- Envejecimiento: 5%

4.5 Modelado del convertidor DC/AC.

Al contrario que ocurre con el modelado climático y del módulo FV, el convertidor DC/AC carece de un modelado interno, ateniéndose a las características ofrecidas por fabricante. Estos convertidores suelen ofrecer la eficiencia de conversión a la salida del convertidor por lo que se aplica directamente este factor para obtener la potencia final en bornas a la salida del mismo.

Sin embargo, existen otras características que son no menos importantes. Tal es el caso de la tensión de entrada en DC, que debe ser igual o menor a la tensión de salida que ofrecen los módulos fotovoltaicos. Al menos para aplicaciones fotovoltaicas domésticas, el mercado ofrece tensiones de continua de 12 y 24 V, tanto en módulos como en convertidores, asegurando la compatibilidad.

La intensidad máxima que el convertidor es capaz de aceptar es otra característica que determinará el número máximo de módulos fotovoltaicos en paralelo que un convertidor puede soportar.

Después de haber contrastado numerosos catálogos de productos fotovoltaicos, se puede observar cierta falta de unidad en cuanto a las características técnicas sobre los inversores que suelen ofrecerse en los distintos fabricantes. Por ejemplo, hay fabricantes que expresan la eficiencia como una curva en función de la potencia a la entrada del convertidor, mientras que otros fabricantes ofrecen como dato una eficiencia de conversión representativa para ciertas condiciones estándar; incluso se da el caso de fabricantes que no expresan la eficiencia.

Ante tal situación, el modelado de sistemas fotovoltaicos se atenderá al criterio de que la eficiencia de conversión es el dato más importante porque expresa la pérdida de potencia

dentro del convertidor. Si el fabricante no proporcionase ese dato, se adoptará un valor por defecto de un 85%, constituyendo una buena aproximación. El resto de las características, aun no siendo imprescindibles, se tendrán en cuenta. Tal es el caso de la corriente máxima soportable por el convertidor, o la tensión de entrada en DC y la tensión de salida en AC.

4.6 Criterios de dimensionado.

Si bien el primer paso para realizar el dimensionado es conocer la potencia que es posible obtener entre hora y hora, el siguiente paso consistirá en su interpretación con objeto de conseguir un diseño de instalación capaz de producir la potencia deseada por el usuario.

Para mayor velocidad, en vez de calcular potencia para cada año, se realiza el cálculo de potencia para un solo año, conocido como Año Meteorológico Típico (AMT), el cual se construye a partir de datos de todos los años de los que se disponen datos.

Existen dos formas de calcular el Año Meteorológico Típico:

- Seleccionando los meses estadísticamente más representativos. Se elige para cada mes un mes tipo, perteneciente a uno de los distintos años. El mes tipo seleccionado es aquél que resulte estadísticamente más representativo.
- Realizando media aritmética directa. Se realiza la media aritmética entre los datos meteorológicos disponibles de todos los años.

El primer método de cálculo parece ser el más utilizado dado que se tendrían en cuenta multitud de datos estadísticos, como la media o varianza de las muestras. Sin embargo, no se observa la existencia de un criterio unánime en la construcción de estos años meteorológicos típicos. Además, la implementación de este método en forma de algoritmos se presenta complicada.

Es por ello que se investigaron caminos alternativos en la implementación del AMT. Se realizaron pruebas calculándolo a través de la media aritmética directa de todos los datos. La implementación informática de este sistema resulta bastante sencilla, porque se realiza para cada hora y día del año la media aritmética de los datos meteorológicos pertinentes.

En definitiva, un AMT es una forma de representar varios años en uno solo. Si bien la primera forma de calcularlo es la más utilizada, la propuesta aquí expuesta es más sencilla y sigue las mismas reglas, porque también representa las muestras de varios años.

Una vez construido el AMT y calculada la potencia para el mismo, sólo queda aplicar el criterio de dimensionado. Por defecto, este criterio será elegir el mes del año con menos productividad y obtener el día medio de ese mes. Así, según cada hora del día medio, la potencia producida varía.

Si se pretende obtener cierta potencia, simplemente debe dividirse ésta entre la potencia obtenible en cada día medio y de esta forma conocer cuantas veces hay que multiplicar la instalación, en número de módulos fotovoltaicos.

Análisis y simulación de sistemas de desalinización de agua de mar por ósmosis inversa.

5.1 Introducción

Como se puede observar en el diagrama que sintetiza el desarrollo de esta tesis, en el presente capítulo se van a desarrollar los conceptos de ósmosis inversa y su funcionamiento, así como la operación de las plantas y su modelado matemático

5.2 Bases físico-químicas de funcionamiento

5.2.1 Definición de una planta de ósmosis inversa

Por desalinización de agua puede entenderse un proceso en el cual se reduce la salinidad del agua hasta un nivel en que pueda ser utilizable. Estos procesos siempre manejan tres flujos: el agua salina original a ser tratada (alimentación), el agua de baja concentración de sal (producto), y el agua salina rechazada, altamente concentrada (concentrado). La fuente de agua a tratar proviene del mar o de pozos salobres

5.2.2 Descripción del proceso

La tecnología de la ósmosis inversa se basa en el proceso de ósmosis, fenómeno natural que se produce cuando dos soluciones, de distinta concentración salina, puestas en contacto a través de una membrana semipermeable tienden a igualar sus concentraciones (Mallevalle et al,1999; Kucera, 2010). Esto es, se crea un flujo natural del agua de la solución menos concentrada hacia la solución de mayor concentración, hasta que se llegue a un equilibrio en donde hay igualdad de concentraciones. La fuerza que provoca ese movimiento se conoce como presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones.

Cuando se colocan dos soluciones de distinta concentración en contacto a través de una membrana semipermeable, el equilibrio se obtiene cuando se alcanza un cierto desnivel Δh , que corresponde a la diferencia de presiones osmóticas entre ambas soluciones. Este valor Δh es la presión diferencial que impulsa el agua con una menor concentración al paso a través de la membrana. Esta diferencia de presión está determinada por la cantidad total de sólidos disueltos al lado concentrado de la solución. Entre mayor sea la cantidad total de sólidos disueltos, mayor es la presión osmótica. Para determinar el valor de la presión osmótica se cuenta con la ecuación de Van't Hoff, cuya expresión tiene la forma:

$$\Pi = iCRT$$

Π = Presión osmótica

C = concentración molar del soluto

i = número de iones formados dada una disociación de la molécula del soluto

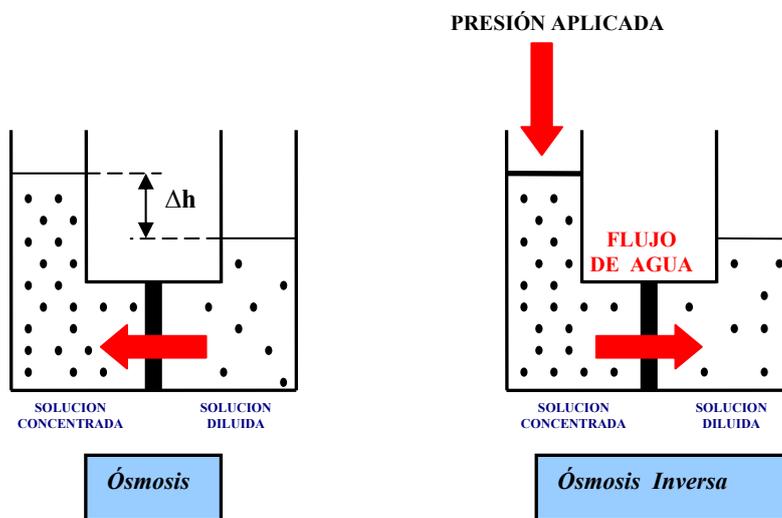


Figura 5.1 Diferencia entre el proceso de ósmosis y ósmosis inversa

Entendiendo el fenómeno de la ósmosis, se describe el proceso de ósmosis inversa como el flujo de agua pura de una solución de mayor concentración hacia una solución de menor concentración, a través de una membrana semipermeable, gracias a una presión externa que supera a la presión osmótica.

Debido a que el soluto y otras impurezas se acumularían en la membrana causando su taponamiento, el proceso de ósmosis inversa no podría ocurrir de la misma manera que indica la figura 5.1 (filtración perpendicular). Por este motivo, se requiere de una filtración transversal para poder remover por arrastre las partículas acumuladas en la membrana (iones, no iones, partículas, y microorganismos).

5.2.3 La salinidad del agua.

El concepto de salinidad de un agua es el contenido total de sales del mismo. Al hablar de la salinidad es necesario saber el tipo de agua.

A lo largo de los años se han establecido diferentes clasificaciones del agua, basadas fundamentalmente en el tipo de aplicación que se le va a dar a la misma. En el siguiente cuadro se recoge un espectro de las diferentes salinidades que puede tener un agua:

Espectro de Salinidades TDS	Salmuera	300.000 ppm
	Agua de mar	30.000 ppm
	Agua salobre	3.000 ppm
	Agua potable	300 ppm
	Agua industrial	30 ppm
	Agua desionizada	3 ppm
	Agua pura de calderas	0.3 ppm
	Agua ultrapura	0.03 ppm

Tabla 5.1 Salinidad de diferentes tipos de agua

Lo normal es que las instalaciones de ósmosis inversa se realicen para tratar aguas que corresponden a los espectros denominados como agua salobre o de mar, aunque también las aguas potables o las industriales son objeto de este tipo de tratamiento.

La salinidad se expresa como residuo seco a 105 °C o TDS (Sólidos Totales Disueltos), y se mide normalmente en mg/l o ppm.

Como la determinación de la salinidad es lenta y se requiere una muestra del agua a tratar, en muchos procesos industriales se precisa tener un control instantáneo del proceso. Esto hace que en lugar de establecerse la salinidad del agua, se determine la conductividad eléctrica, dado que este parámetro sí se puede medir de una forma rápida y bastante precisa "in situ".

La conductividad eléctrica (CE) es la facilidad o habilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica.

Un agua químicamente pura no conduce la corriente, pero a medida que se van disolviendo en ella distintos elementos se va haciendo conductora.

Pero la conductividad eléctrica de un agua determinada, no es un parámetro constante sino que depende de la temperatura, aumentando su valor al hacerlo ésta. También es necesario saber que, a medida que aumenta la conductividad de un agua, lo hace su poder de corrosión. Como unidad de conductividad se utiliza el S/cm (Siemens/cm), aunque como esta unidad es muy grande, se suele expresar en sub-unidades más pequeñas tales como el mS/cm o incluso en $\mu\text{S/cm}$.

Lógicamente existe una relación entre la conductividad eléctrica y la salinidad, lo que permite el paso inmediato de una a otra unidad, aunque dicha relación no sea rigurosamente fija y exacta. En un agua natural, por ejemplo, el coeficiente de paso aproximado entre una y otra magnitud es de 0,64 o múltiplos de este valor:

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE } (\mu\text{S/cm}) \times 0,64$$

Pero esta relación es algo distinta en otros tipos de aguas, en función de la composición química de éstas. Así por ejemplo, en las aguas desaladas por ósmosis inversa, como dichas aguas contienen más sodio y cloruros que calcio, magnesio y sulfatos, las concentraciones de aquellos suelen ser de 2,13 y 2,14 $\mu\text{S/cm}$. Por esta razón, de forma aproximada puede obtenerse que:

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE } (\mu\text{S/cm}) \times 0,51$$

Cuando se empieza a operar una planta desaladora, es necesario realizar desde principio esta determinación, para que sirva de referencia futura, tomando una muestra de agua, y determinando la salinidad total y la conductividad en un laboratorio, de manera que se establezca un coeficiente de paso adecuado.

La salinidad total y el contenido de sales concretas de un agua mar es menos variable que el de un agua salobre (aguas superficiales, subterráneas, ríos o lagos).

Se estima que la salinidad media del agua de mar está en torno a los 35.000 ppm con una presión osmótica $\Pi \approx 385$ psi (lo que establece una relación aproximada de 100 ppm = 1psi). O también la relación aproximada de 1000 ppm = 11 psi de presión osmótica.

5.2.4 Composición química del agua.

Dada la variedad de elementos que pueden encontrarse en el agua y que son los causantes de la salinidad, conviene repasar cuáles son estos elementos y saber las características que le confieren al agua.

No todos los elementos se encuentran en las mismas proporciones, por lo que debe hacerse una separación entre elementos principales y secundarios, que aún encontrándose en pequeñas proporciones pueden ser negativos para la salud humana, las plantas o las propias membranas de desalación. Como elementos principales nos encontramos:

a) Sodio

Es el metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas. Todos los compuestos sódicos son solubles, lo que significa que no precipita sobre las membranas.

Según si el uso que se le va a dar al agua desalada es para abastecimiento humano o para fines agrícolas, existen unos contenidos máximos que no deben rebasarse y que vienen determinados por los problemas cardiovasculares para el primero, y su contribución al deterioro e impermeabilidad de la estructura del suelo, en el segundo. El actual reglamento sanitario fija el contenido máximo de sodio en 150 ppm.

b) Calcio y Magnesio

Se encuentran en todas las aguas y forman parte de numerosas sales, por lo que su influencia en las características depende del tipo de sales en que estén presentes. Ambos son responsables en gran medida de las incrustaciones que se producen cuando el agua experimenta cambios en la temperatura, pH y presión. El contenido máximo de magnesio de un agua destinada al consumo humano no debe sobrepasar los 50 ppm. En cuanto al calcio, los límites establecidos están en 60 ppm. Desde el punto de vista agrícola, los problemas que generan ambos iones en el riego son indirectos, puesto que bloquean la absorción de otros elementos por la planta y favorecen las incrustaciones de carbonatos en los elementos de riego.

c) Cloro

Es el elemento más abundante en el agua de mar, donde alcanza concentraciones de hasta los 20.000 ppm. Respecto a los niveles deseables de cloro en un agua, son bastante variables en función del destino final que se vaya a dar a la misma, aunque en general valores de unos 150 ppm se consideran adecuados para la mayor parte de los usos. Al igual que en el sodio, hay restricciones con respecto al contenido máximo de este elemento que no debe superar los 250 ppm. Respecto a los usos agrícolas, existe una diferencia entre los sistemas de riego directos a las hojas e indirectos, puesto que el cloro las quema. En el primer caso, los 100 ppm son valores excesivos, mientras que en el segundo pueden llegarse a los 350 ppm.

d) Sulfatos

Proceden fundamentalmente del yeso o anhidrita, siendo los más frecuentes el sulfato sódico y el magnésico. Desde el punto de vista sanitario no deben sobrepasarse los 250 ppm. En cuanto a los usos agrícolas, concentraciones superiores a 1.200 ppm se consideran negativas. El principal problema de los sulfatos en cuanto a la desalación por ósmosis inversa, es su posibilidad de formar precipitados de calcio y magnesio.

e) Carbonatos y Bicarbonatos

Se encuentran en todas las aguas y a veces en proporciones muy elevadas. Como las membranas de OI tienen un elevado rechazo de estos iones, se concentran en el rechazo y pueden precipitar. Dentro de los elementos secundarios que se pueden encontrar en el agua, se pueden citar a los nitratos, hierro, sílice, flúor, manganeso, bario, estroncio y gases disueltos.

f) Nitratos

Las altas concentraciones de nitratos pueden ser consideradas como indicadores y aviso que debe ser tenido en cuenta para comprobar la presencia de bacterias peligrosas. En concentraciones superiores a los 45 ppm, son indeseables para usos domésticos.

g) Hierro

Contenidos de 0,5 ppm son normalmente perjudiciales, e incluso en algunos procesos industriales no se permiten concentraciones superiores a los 0,1 ppm.

h) Sílice

Aunque no contribuya a la dureza del agua, es una parte importante de las incrustaciones formadas por muchas aguas. Contenidos de 20 ppm son normales, aunque se puede llegar a las 100 ppm. Como la sílice es rechazada en un porcentaje superior al 99% por las membranas, se concentra en el rechazo y pueden producirse precipitaciones de silicatos de magnesio y calcio. No conviene superar en el rechazo concentraciones superiores a 150 ppm.

i) Flúor

Es uno de los componentes más problemáticos del agua en los procesos de desalación, ya que su rechazo por las membranas es elevado y la solubilidad de sus sales que se concentran en la salmuera muy baja, siendo los riesgos de precipitación altos. Se admiten contenidos máximos de flúor en el agua de 1,5 ppm.

j) Boro

El boro es un elemento no metálico cuya ingesta puede causar el envenenamiento, provocando síntomas como trastornos gastrointestinales, erupciones cutáneas, depresiones, infertilidad en el hombre, etc. La OMS recomienda un valor guía para este elemento de 0,5 ppm, aunque el actual Decreto 140/2003 de nuestro país eleva esa cantidad a 1 ppm.

IONES	USO HUMANO	USO AGRÍCOLA
Sodio (Na⁺)	150	150
Calcio (Ca⁺⁺)	50	--
Magnesio (Mg⁺⁺)	60	--
Cloro (Cl⁻)	250	100/350
Sulfatos (SO₄⁼)	250	1200
Nitratos (NO₃⁻)	45	--
Hierro (Fe⁺⁺)	0,5	--
Sílice (SiO₂)	20 - 100	--
Flúor (F⁻)	1,5	--
Boro (B⁺)	1	--

Tabla 5.2 Resumen con valores máximos admisibles de presencia de iones en agua para consumo humano y agrícola

5.2.5 Otros parámetros característicos del agua

a) Temperatura

La temperatura del agua varía bastante no sólo en función de la zona, sino también según se trate de aguas subterráneas o superficiales, aguas salobres, aguas de mar.

La influencia de las temperaturas en el funcionamiento de las membranas es importante desde tres puntos de vista:

- La solubilidad de determinadas sales aumenta con la temperatura y por tanto, a temperaturas más elevadas se reducen sus riesgos de precipitación.
- La temperatura influye en la viscosidad del agua y en la dilatación de los materiales que constituyen las membranas.
- La elevación de la temperatura favorece la actividad biológica de los microorganismos que ocasionan el ensuciamiento de las membranas.

Además, la temperatura afecta a la presión osmótica como a la permeabilidad del agua a través de la membrana. Normalmente se acepta que el flujo de permeado se incrementa alrededor de 3% por cada grado °C de incremento de temperatura.

b) pH

Desde el punto de vista de la desalación por membranas, ejerce dos tipos de acciones:

- Influye en la solubilidad de los carbonatos y regula por tanto su precipitación.
- Limita el empleo de las membranas de acetato de celulosa que a valores entre 5,5 y 6,5 para evitar hidrólisis del polímero. En poliamida, el rechazo aumenta al subir el pH hasta 8,0 y luego se estabiliza hasta 10,5.

c) Dureza

Puede ser de dos formas:

- Carbonatada, causada por los carbonatos de calcio y magnesio
- No carbonatada, causada por los nitratos, cloruros y sulfatos de calcio y magnesio.

Las aguas para consumo humano deben tener una dureza menor a los 60 ppm expresada en calcio, según el Real Decreto 140/2003.

d) Turbidez

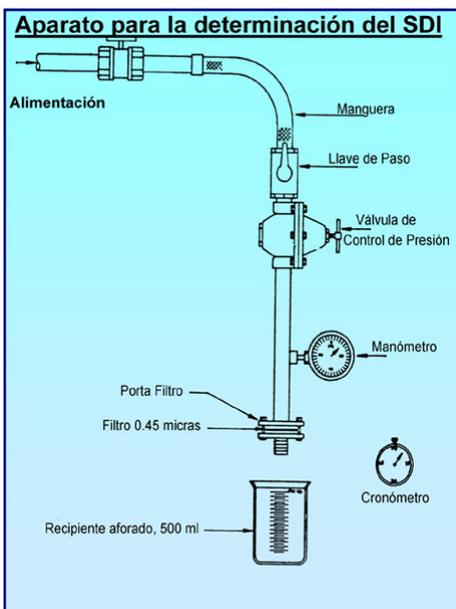
La turbidez del agua consiste en la cantidad de partículas (que pueden ser orgánicas o inorgánicas) suspendidas, que dan la apariencia de nubes de polvo. La turbidez se caracteriza por la lenta deposición de estas partículas debido a su diminuto tamaño. No se puede correlacionar la turbidez del agua con los elementos presentes o su concentración, debido a que la absorción de luz es diferente entre materiales. Las unidades de turbidez representan la habilidad de la luz de atravesar el agua, independiente del nivel de contaminación. Actualmente se emplea el método nefelométrico, que mide la intensidad de la luz dispersada a 90 °C del

rayo de luz incidente. Las unidades empleadas son las NTU. El actual reglamento sanitario establece un límite máximo de 1 NTU para agua de abastecimiento humano.

e) Índice de densidad de sedimentos (SDI)

El índice de ensuciamiento “SDI” (*Silt Density Index*) es un ensayo que estima la disminución del flujo a través de una membrana como efecto del ensuciamiento de la misma, a una presión constante de 30 psi. Un alto valor de SDI (>5), indica que en el agua a tratar están presentes altas concentraciones de sólidos en suspensión y coloides.

El aparato para medir el SDI consiste en un regulador de presión y un portafiltros, en el cual se coloca un filtro de 0,45 micras de poro. A una presión de 30 psi se determina el tiempo que tarda en filtrarse 500 ml del agua en observación. Posteriormente se deja correr el agua a través del filtro durante 15 minutos, determinándose nuevamente el tiempo que ha tardado en filtrarse otros 500 ml del agua en estudio. El SDI se determina entonces como:



$$SDI = 100 \cdot \frac{1 - (t_1 / t_2)}{T}$$

T = tiempo entre mediciones

t_1 = tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al inicio de la prueba

t_2 = tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al final de la prueba

Figura 5.2 Determinación del S.D.I.

Los fabricantes de membranas suelen establecer como prerrequisito, para que la garantía ofertada por la membrana tenga validez, que el agua a tratar tenga un SDI entre 3 y 5, como máximo, para membranas arrolladas en espiral.

f) Normativa sobre la calidad del agua

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la calidad de cualquier agua destinada a un consumo o abastecimiento humano no debe superar los 500 ppm. De cualquier forma, en España el agua para consumo humano deberá cumplir el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, en donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

5.2.6 Parámetros operativos en un sistema OI.

Consideremos de nuevo el sistema anterior pero suponiendo que ejerciésemos en el compartimento 2 una presión superior a la diferencia de presiones osmóticas, tal como muestra la figura 5.3. En tal caso podríamos comprobar que la difusión del agua ocurriría en sentido inverso y que el soluto seguiría sin poder atravesar la membrana. A este fenómeno se le conoce como ósmosis inversa.

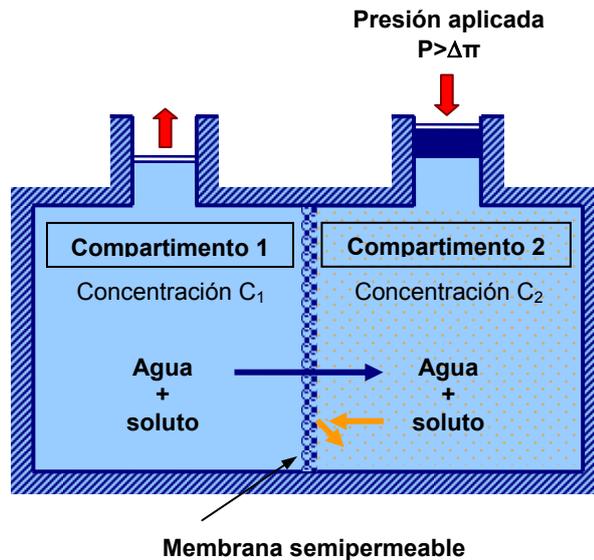


Figura 5.3: Esquema de principio de la ósmosis inversa.

Desde el punto de vista industrial el proceso se desarrolla como muestra de forma simplificada la figura 5.4

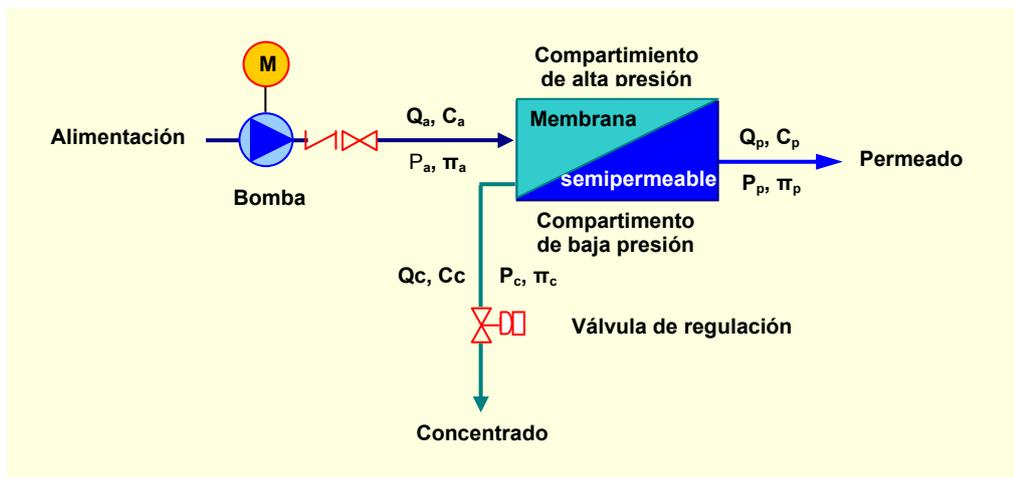


Figura 5.4: Esquema del proceso industrial de la ósmosis inversa.

Una bomba envía la alimentación hacia una membrana semipermeable manteniendo permanentemente una elevada presión en uno de sus lados, con lo que una parte del solvente y una cantidad muy pequeña de soluto atraviesan la membrana.

Tanto la solución que atraviesa la membrana como la que es rechazada por ella evacuan en continuo de sus compartimientos.

El concentrado presenta habitualmente una elevada concentración de sustancias disueltas, siendo baja la del producto o permeado.

Una válvula de regulación situada en la tubería de rechazo controla el porcentaje de solución que es convertida en producto.

Definiciones y Nomenclatura

En el proceso de la ósmosis inversa los conceptos más importantes y sus nomenclaturas son:

- a) **Alimentación:** Es la solución que llega a las membranas de ósmosis inversa. La nomenclatura que se utiliza para esta solución es:

- Caudal: Q_f
- Concentración: C_f
- Presión hidráulica: P_f
- Presión osmótica: π_f

Al compartimento que contiene esta solución se le llama de alta presión. A la cara de la membrana en contacto con este compartimento se le conoce con el nombre de lado de alta

- b) **Producto o permeado:** Es la solución que se obtiene al otro lado de la membrana, después de atravesarla. La nomenclatura utilizada es:

- Caudal: Q_p
- Concentración: C_p
- Presión hidráulica: P_p
- Presión osmótica: π_p

Al compartimento que contiene esta solución se le denomina de baja presión y a la cara de la membrana en contacto con él, el lado de baja.

- c) **Concentrado:** Es la solución, más concentrada que la aportación que no puede atravesar la membrana. También se le suele llamar rechazo o salmuera de rechazo. La nomenclatura utilizada es:

- Caudal: Q_c
- Concentración: C_c
- Presión hidráulica: P_c
- Presión osmótica: π_c

d) **Coefficiente de permeabilidad:** Es el volumen de solvente (agua) que atraviesa la membrana por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de presión a temperatura y salinidad determinadas y constantes. Suele medirse en $m^3/m^2 \cdot día \cdot bar$, o también en $m/d \cdot bar$. Se representa por **A**.

e) **Factor de conversión:** Es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre el caudal de producto y el caudal de alimentación que llega a las membranas.

$$Y = 100 \cdot \frac{\text{Caudal de permeado}}{\text{Caudal de aportación}} = 100 \cdot \frac{Q_p}{Q_f}$$

También se le suele llamar coeficiente de recuperación. Se llama conversión al porcentaje de recuperación expresado en tanto por uno, se representa por y :

$$y = \frac{Q_p}{Q_f}$$

f) **Porcentaje de rechazo de sales:** Es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre la concentración de la alimentación menos la del producto y la concentración de la alimentación. Se representa por R .

$$R = 100 \frac{C_f - C_p}{C_f}$$

El rechazo en tanto por uno es:

$$r = \frac{C_a - C_p}{C_a} = 1 - \frac{C_p}{C_a}$$

de donde se deduce que:

$$C_p = (1 - r)C_a$$

- g) **Porcentaje de paso de sales:** Es el cociente, en tanto por ciento, entre la concentración de sales en el permeado y en la alimentación. Se representa por P_s .

$$PS = 100 \frac{C_p}{C_f}$$

El paso de sales en tanto por uno es:

$$p_s = \frac{C_p}{C_f}$$

Sustituyendo valores en la ecuación se obtendría:

$$r = 1 - p_s$$

$$C_p = p_s \cdot C_f$$

- h) **Factor de concentración:** Es el número de veces que se concentran las sales en el rechazo de la ósmosis inversa. Su valor es igual al cociente entre las concentraciones de sales en el concentrado y en la alimentación.

$$F_c = \frac{C_c}{C_f}$$

- i) **Relación entre los distintos Parámetros:** Considerando constante la densidad de las distintas soluciones, se pueden establecer las siguientes relaciones:

Conservación del solvente: $Q_f = Q_p + Q_c$

Conservación del soluto: $Q_f C_f = Q_p C_p + Q_c C_c$

$$Q_p = y Q_f$$

Partiendo de las ecuaciones anteriores y operando:

$$Q_c = (1 - y) Q_f$$

$$C_c = \frac{1 - (1 - y)y}{1 - y} C_f$$

$$F_c = \frac{1 - (1 - y)y}{1 - y}$$

5.2.7 Aplicaciones de la Ósmosis Inversa.

La utilización habitual de la ósmosis inversa está en soluciones acuosas, en todas sus variantes. Así, pueden tratarse:

- Aguas naturales salobres y de mar
- Aguas residuales urbanas
- Aguas industriales
- Soluciones acuosas en la industria alimenticia

Las aplicaciones son asimismo variadas:

- Desalación de aguas para suministro público, para riego, etc..
- Reutilización de aguas residuales depuradas
- Extracción de agua ó concentración de zumos, etc

Industria	Aplicación
Alimenticia	Deshidratación de productos Concentración de zumos Estabilización de mostos vinícolas Desalcoholización de cerveza
Papelera	Reciclado de aguas de lavado Recuperación de productos aprovechables
Textil	Tratamiento y renovación e los efluentes de tintes
Metalúrgica	Depuración de baños galvánicos Reciclado de baños de Cr(VI)
Recuperación y purificación de agua	Agua esterilizada Industria electrónica Desalinización
Nuclear	Concentración de productos de fisión

Tabla 5.3 Aplicaciones industriales de la OI

5.3 Tecnología de las plantas de ósmosis inversa.

5.3.1 Membranas de Ósmosis Inversa

5.3.1.1 Introducción

En general, se puede decir que una membrana sintética semipermeable es una barrera selectiva o interfase, que separa dos sistemas multicomponentes en fase líquida, limitando el transporte de algunas especies químicas presentes en una determinada dirección.

La transferencia de cada componente puede tener lugar por difusión molecular o por flujo convectivo, inducidos por un gradiente de potencial electroquímico, que en el caso de la ósmosis inversa, está originado por diferencia de presión hidrostática entre las dos fases líquidas que están en contacto con la membrana.

Las características más importantes que debe presentar una membrana de OI son: un alto grado de permeabilidad al agua y un alto nivel de rechazo de iones (selectividad), así como unas buenas condiciones de estabilidad frente a un amplio rango de pH, temperatura, agentes químicos y mecánicos.

Específicamente, los materiales que componen la estructura de las membranas utilizadas en los procesos de ósmosis inversa, incluyen fundamentalmente 2 tipos: los que incluyen polímeros altamente ordenados, como el acetato de celulosa (AC) y los derivados de poliamidas aromáticas (PA).

Desde el punto de vista de las configuraciones, las membranas de ósmosis inversa que se han desarrollado a lo largo de los últimos años, se han estructurado en cuanto a la configuración en torno a cuatro tipos:

- Membranas de tipo plano
- Membranas tubulares
- Membranas de fibra hueca
- Membranas de arrollamiento en espiral

Hoy en día, cobran especial importancia las de arrollamiento en espiral y fibra hueca, dado que son las más utilizadas en las instalaciones.

5.3.1.2 Membranas de Acetato de Celulosa (AC).

Estas membranas están hechas de una mezcla de diacetato y triacetato de celulosa. Se forman por la unión íntima de una capa fina activa de un polímero de AC en una disolución de acetona con determinados aditivos, sobre una base de poliéster. Tras el proceso de unión de ambas capas, las membranas se calientan en un baño de agua a una temperatura entre los 60 y 90 °C.

El rechazo de sales y el flujo de agua característicos de una membrana de este tipo se establece en el proceso de fabricación, mediante el control de la temperatura y la duración del proceso de calentamiento.

Los mejores rendimientos se consiguen con presiones superiores a las 27 at. Esto les supone un campo de aplicación en la desalación de aguas con una alta salinidad. En la siguiente tabla se recogen las principales características de este tipo de membranas resumidas.

Ventajas	Inconvenientes
Alta permeabilidad	Alta sensibilidad a la hidrólisis
Elevado porcentaje de rechazo de sales	Posibilidad de degradación
Tolerancia al cloro libre	Alto riesgo de disolución de la membrana
Bajo costo	Aumento del paso de sales con el tiempo
	Elevadas presiones de trabajo

Tabla 5.4 Membranas de acetato de celulosa

5.3.1.3 Membranas compuestas de Poliamida (PA).

Se trata de membranas fabricadas en 2 etapas las cuáles se forman con una capa de polisulfona, una capa muy esponjosa de poliéster no entretrejido y una fina película semipermeable montada sobre el sustrato de polisulfona.

Debido a su proceso de fabricación, estas membranas presentan unas características de altos flujos de agua y bajo paso de sales, mejorando sustancialmente a las de AC. No obstante este tipo de membranas son muy susceptibles de sufrir degradación por oxidación cuando entran en contacto con cloro libre.

Superficialmente, las membranas de AC son más uniformes y presentan una menor carga eléctrica. Por este motivo, y dada su mejor tolerancia al cloro libre, éstas presentan un funcionamiento más estable que las de PA en aquellas aplicaciones en las que el agua de alimentación presentan un alto factor de ensuciamiento o "fouling".

Sin embargo, las membranas de PA resisten mucho mejor el ataque microbiano que las de AC. También presentan una vida media superior a las membranas de AC en base a su mayor resistencia mecánica, resistencia física y mejor tolerancia química.

Ventajas	Inconvenientes
Alto porcentaje de rechazo de sales	Sensibilidad frente a los oxidantes
Ausencia de hidrólisis	Fácil ensuciamiento
No biodegradabilidad	Fácil aparición de desarrollos biológicos
Alta estabilidad química	Alto costo
Paso de sales a lo largo del tiempo	
Presiones de trabajo reducidas	

Tabla 5.5 Membranas de poliamida aromática

Los mejores rendimientos de estas membranas se consiguen con presiones que varían en el rango de las 10-20 at. La tabla 5.6 compara los dos tipos principales de membranas que se acaban de describir.

Parámetro		Celulósicas	Poliamida	
			Lineal	Entrecruzada
Permeabilidad		Alta	Baja	Alta
Rechazo de cloruros (%)	Baja presión	75	96	98
	Media presión	95 – 97,5	96	98,2
	Alta presión	99	99,4	99,4
Rechazo de nitratos (%)		85	88 - 94	98
Rechazo de sílice (%)		90 – 93	88 - 94	98
Presión de trabajo (bar)	Baja presión	16	16	10
	Media presión	30	30	20
	Alta presión	60 – 70	70 – 84	60 – 70

Parámetro	Celulósicas	Poliamida	
		Lineal	Entrecruzada
Hidrólisis	Sí	No	No
Biodegradabilidad	Sí	No	No
pH de trabajo	4,5 – 6,5	4 – 9	4 – 11
Resistencia al cloro libre	< 1 ppm	0 ppm	1.000 ppm
Resistencia a otros oxidantes	Moderada	Mala	Regular
Riesgo de ensuciamiento	Bajo	Medio	Alto
Compactación	Alta	Alta	Baja
Temperatura máxima (°C)	35	40	45

Tabla 5.6 Comparación entre membranas celulósicas y de poliamida

5.3.1.4 Membranas de arrollamiento en espiral.

Se trata de las más usadas en los procesos de OI debido a que son las más compactas y económicas. Aunque presentan una productividad algo más baja que las de fibra hueca, esto queda ampliamente compensado con las siguientes ventajas:

- son más resistentes al ensuciamiento.
- permiten trabajar con aguas más cargadas de partículas.
- su efectividad y facilidad de lavado.
- un mejor control de calidad del proceso de fabricación.
- más económicas frente a las de fibra hueca.

Esta configuración se llama así porque está formada por membranas planas enrolladas en espiral alrededor de un tubo central.

Cada “paquete”, consta de una lámina rectangular de membrana semipermeable doblada por la mitad de forma que la capa activa quede en su exterior. Entre las dos mitades se coloca un tejido provisto de diminutos canales para recoger el permeado que atraviese la membrana y conducirlo hacia el tubo central de recogida. Encima de la capa activa de la membrana se coloca una malla provista de canales de distribución para repartir homogéneamente la solución de aporte sobre toda la superficie de la membrana.

Para conseguir la estanqueidad entre la solución de aporte y el permeado se colocan, en los laterales de la lámina de ósmosis inversa, cordones de cola entre el tejido colector de permeado y las membranas, de forma que el sellante penetre totalmente en los tejidos. Los laterales del tejido colector del permeado se encolan igualmente al tubo central que es de material plástico y va provisto de orificios.

El paquete así formado se enrolla alrededor del tubo central dando lugar a un cilindro al que se le colocan en sus extremos dos dispositivos plásticos para evitar su deformación, tras lo cual se recubre el conjunto con una capa de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio para darle la rigidez y la resistencia mecánica necesarias.

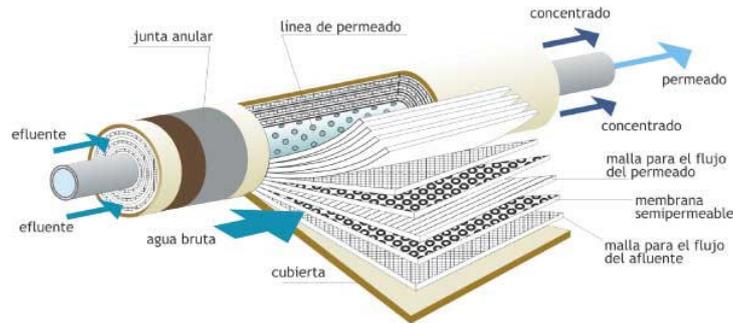


Figura 5.5 Módulo espiral

El rechazo de este tipo de membranas suele estar en torno al 99,5% de las sales. Los tamaños comercializados son los que tienen por diámetro 1,5 – 1,8 – 2 – 2,5 – 4 y 8” (pulgadas).

En cuanto a su longitud, las membranas espirales más comerciales suelen ser de 1 metro aunque las de 8” se fabriquen también de 1,5 metros.

5.3.1.5 Clasificación según la presión de trabajo

El parámetro fundamental que define las condiciones de operación de una planta de ósmosis inversa es la presión de trabajo. Como dicha presión debe ser varias veces superior a la presión osmótica de la solución de aporte, debido por un lado, a los fenómenos de polarización de la membrana, y por otro al aumento de concentración que se produce a medida que se va generando permeado, su valor vendrá condicionado por la salinidad de la solución a tratar. En la actualidad, las membranas de ósmosis inversa disponibles en el mercado pueden encuadrarse en una de las cuatro categorías siguientes:

a) Membranas de muy baja presión

Son las que trabajan con presiones comprendidas entre 5 y 10 bares. Se utilizan para desalar aguas de baja salinidad (entre 500 y 1.500 mg/l) y obtener agua ultra pura. Estas membranas han sido concebidas igualmente para competir contra el proceso de desmineralización de agua con resinas intercambiadoras de iones.

b) Membranas de baja presión

Este tipo de membranas trabajan a una presión comprendida entre 10 y 20 bares, Se utilizan para desalar aguas de salinidad media (entre 1.500 y 4.000 mg/l), así como para reducir o eliminar de ella ciertos compuestos como nitratos, sustancias orgánicas, pirógenos, etc.

c) Membranas de media presión

La presión de trabajo de estas membranas está comprendida entre 20 y 40 bares. Desde el punto de vista histórico, éstas fueron las primeras membranas que se comercializaron. Aunque

se han venido empleando para desalar aguas de elevada salinidad (entre 4.000 y 10.000 mg/L), en la actualidad sus aplicaciones se han generalizado utilizándose en múltiples procesos de separación y concentración.

d) Membranas de alta presión

Estas membranas se han desarrollado para poder obtener agua potable a partir del agua del mar. Su presión de trabajo, debido a la elevada presión osmótica del agua de mar (20-27 bares, llegando en el Mar Rojo a 35 bares), está comprendida entre 50 y 80 bares. El fin de los distintos fabricantes de este tipo de membranas no ha sido sólo obtener agua potable a partir de agua de mar, sino hacerlo en un sólo paso. Y como las recomendaciones de la O.M.S. para el agua potable indicaban que su contenido máximo en sales disueltas no debía ser superior a 500 mg/l (ppm), el porcentaje mínimo de rechazo de sales que debían presentar estas membranas tenía que ser del orden del 99 %.

5.3.2 Pretratamientos en la desalación.

5.3.2.1 Introducción

El agua de mar se caracteriza por los elevados niveles de partículas suspendidas que contiene, así como por las variaciones microbiológicas y estacionales. Cada lugar conferirá al agua de alimentación unas características físicas, químicas y biológicas que será fundamental caracterizar para el diseño de cada planta desaladora y para cada punto de la instalación (Fariñas, 1999; Medina, 1999).

Se han realizado estudios que demuestran que las medidas tendentes a reducir los elementos presentes en el agua de alimentación pueden dar lugar a costos menores y a alargar la vida de los elementos implicados directamente en los procesos de desalación, lo que conlleva a la larga a precios más competitivos del agua producto. El pretratamiento de las aguas que alimenta un sistema de ósmosis inversa es indispensable para minimizar problemas de taponamiento (*fouling*) a causa de las partículas suspendidas o de deposición (*scaling*) por las sales disueltas, que afectan la vida útil de la membrana y su rendimiento.

La disminución del rendimiento ocurre porque el aumento de las sustancias depositadas sobre la superficie de las membranas provoca una polarización de éstas, lo que provoca un aumento del paso de las sales y una disminución de la productividad. Además dichas sustancias atrapadas originan aumentos localizados de la pérdida de carga dando lugar a un reparto irregular de los flujos a través de las membranas. Esta irregularidad en el reparto de los flujos acelerará la concentración por polarización y el ensuciamiento de la membrana.

Debe por tanto acondicionarse, sometiéndola a una serie de tratamientos que globalmente responden a dos tipos:

- **Físicos**, destinados a eliminar fundamentalmente los elementos sólidos, algas y materia orgánica.
- **Químicos**, para evitar ataques a la membrana o precipitados de sales sobre la misma.

Cuando el rendimiento de la planta OI desciende por debajo de unos determinados límites, es necesario limpiar las membranas para restaurar, si es posible, sus características primitivas de funcionamiento. Sin embargo, la limpieza de las membranas no puede ser un procedimiento alternativo a un inadecuado pretratamiento, pues al aumentar la frecuencia de las limpiezas de las membranas se aumenta su deterioro y se reduce consecuentemente su vida media.

Por ello, la operación de pretratamiento del agua de alimentación en un sistema de OI debe ser concebido como un proceso vital para asegurar largos y sucesivos periodos de trabajo de las plantas.

5.3.2.2 Pretratamientos Físicos.

Los componentes físicos en suspensión del agua comprenden desde arenas hasta partículas coloidales. El ensuciamiento por elementos sólidos no tiene sólo efectos de tipo físico, por rozamiento y desgaste u obstrucción de los poros de la membrana, sino que en la mayoría de los casos, la película o capa de partículas depositada sobre la superficie de éstas produce además cambios en las condiciones hidráulicas de funcionamiento de las mismas, que induce la formación de precipitados químicos.

En general, la eliminación de las partículas se resuelve mediante la utilización de filtros, formados por una o más capas de material filtrante. En muchas ocasiones, la filtración deberá mejorarse con técnicas de decantación, floculación y coagulación. Asimismo, deberá recurrirse a una fase posterior de filtración sobre cartuchos, por motivos de seguridad y como exigencia comprendida dentro de las garantías que ofrecen los fabricantes de membranas. Los equipos que normalmente se utilizan son:

- Filtros de arena
- Filtros de cartucho
- Filtros de precapa
- Filtros especiales

En las instalaciones OI los dos primeros tipos de filtros son los más importantes, mientras que por ejemplo, los filtros precapa tienen una aplicación fundamental en la industria alimenticia, química y farmacéutica.

Por otro lado, el agua que se va a tratar viene identificada, desde el punto de vista físico, por una serie de parámetros que son los que imponen las membranas. Los más importante son la turbidez y el índice de colmatación SDI, a los que se hace alusión en el apartado 6.4 del presente documento.

a) Filtros de arena

Con este nombre se conocen los filtros que constan de una o más capas de material filtrante de distintos materiales de granulometría variable.

En ellos se introduce el agua por la parte superior y va percolando más o menos lentamente a través de las distintas capas, para recogerse el agua filtrada por la parte inferior. La velocidad de filtración depende de varios factores como:

- Presión aplicada
- Granulometría utilizada
- Profundidad de la capa o capas de material

Los filtros que se utilizan pueden ser tanto depósitos abiertos como cerrados, y en ellos se deposita el material poroso que actúa a modo de medio filtrante. Ello determina los dos sistemas fundamentales de filtros de arena existentes, abiertos o de gravedad y cerrados o de presión.

Además, por la forma en que se realiza el proceso de filtración, puede hablarse de filtración lenta y rápida.

Los filtros lentos utilizan velocidades de filtración muy bajas, $0,1 - 0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$. son más fáciles de operar y se limpian solamente con agua a contracorriente.

Los filtros rápidos funcionan a velocidades que varían entre los $5 - 7,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para los filtros de gravedad y los $7 - 12 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para los filtros de presión.

En los filtros abiertos la altura de la columna de agua necesaria para efectuar la filtración es de $1 - 1,5 \text{ m}$ y por ello la velocidad no es tan elevada.

Los filtros de presión empleados en las instalaciones de ósmosis inversa trabajan a $3,5 - 7,5 \text{ kg/cm}^2$ y pueden ser verticales u horizontales. Son unos depósitos generalmente metálicos, en los cuáles en la parte inferior, se colocan unos colectores que recogen el agua que atraviesa en forma descendente el material filtrante.

Materiales filtrantes

Aunque con aguas sin demasiados problemas de turbidez, como suele ser el caso de las tomas de agua de pozo, una simple capa es suficiente, cuando el agua es más problemática, se emplean filtros multicapa, formados por varias capas de materiales distintos. Estos materiales suelen ser grava de distinta granulometría, granate, green sand, antracita, magnetita...

En tomas de pozo son frecuentes granulometrías de $0,8$ a $1,2 \text{ mm}$, pero si las condiciones del agua empeoran y se requiere una segunda capa, la antracita es el material preferido pues elimina las partículas más gruesas eficazmente y permite el paso de las partículas más finas a las capas de arena más profunda.

Sistemas de lavado

Cuando el filtro se ensucia, es decir los huecos del material filtrante se obstruye, es necesario proceder a su limpieza. Esta limpieza consiste en la recirculación del agua en sentido contrario al de la filtración, aplicando un caudal de agua superior al de ésta, que permita la expansión del medio poroso en un $15 - 20\%$ para que los sólidos se remuevan y desprendan de las partículas

y sean arrastrados por la corriente de agua. Este sistema se conoce con el nombre de lavado a contracorriente (*backwashing*).

Otro sistema de lavado es con aire. Para llevarlo a cabo, se necesita una bomba para el agua y una soplante para el suministro de aire. Es el que se emplea en la actualidad en instalaciones de filtración de un cierto nivel.

Parámetros de diseño

Un filtro viene definido fundamentalmente por las velocidades de filtración y a partir de ellas se determina la superficie filtrante. Pero además, deben analizarse estos otros tres aspectos principales:

- Tipo de medios filtrantes
- Granulometría del medio filtrante
- Espesor de las capas filtrantes

Selección de filtros de arena

Existen dos aspectos que influyen de manera importante en dicha selección:

- El espacio o superficie disponible
- El tamaño de los bastidores

Respecto al primero, en los filtros abiertos se aprovecha mejor el espacio, y además permiten mayores tamaños, que por consiguiente reducen el conjunto de colectores, válvulas y mecanismos en la instalación. Pero estos filtros sólo tienen sentido a partir de ciertas dimensiones mínimas de 15 m².

Por otro lado, considerando importante disponer de líneas de producción completas e independientes, la capacidad del bastidor determina la superficie filtrante requerida.

En cuanto a la elección entre filtros de presión horizontales o verticales, la menor capacidad de estos últimos los reservará para instalaciones más pequeñas, con caudales máximos de 75 m³/h por filtro.

b) Filtración por cartuchos

Son imprescindibles en las instalaciones OI pues se consigue la eliminación de partículas de pocas micras. Constituyen una filtración de afino para protección de las membranas desaladoras.

Los cartuchos que constituyen el elemento filtrante están formados por un eje hueco con perforaciones laterales, sobre el que se enrolla un hilo que es el material filtrante.

El nivel de filtración al que hay que llegar es de 5 micras, pues éste es el valor que imponen los fabricantes de membranas para garantizar el funcionamiento de éstas. Las dimensiones de estos cartuchos son variables en longitud entre 0,25 m y 1,25 m. Las velocidades medias de filtración que se establecen son de 2–3 m³/h por cartucho de 1m de longitud y 2 ½" de diámetro.

Las partículas retenidas por los cartuchos incrementan las pérdidas de carga del mismo, por lo que cuando se alcanza un valor determinado se procede a su sustitución, puesto que éstas no se desprenden fácilmente, como ocurre con otros filtros.

c) Filtros precapa

En situaciones de trabajo difíciles, como en tomas abiertas con peligro de contaminación por vertidos, es necesario reforzar la seguridad de filtración mediante la utilización de filtros de precapa.

También como en el caso de los filtros de arena, existen filtros de precapa abiertos y cerrados. El principio de ambos es el mismo y consiste esencialmente en un elemento de filtración que actúa a modo de soporte, sobre el que se deposita una capa de material filtrante muy fino, lo más frecuente arena de diatomeas, carbón activo o materiales inertes. El agua antes de atravesar el elemento de filtración tiene que atravesar esa precapa.

Sin embargo aunque el principio sea el mismo la aplicación y eliminación de la precapa requiere una técnica especial. Los filtros de precapa cerrados son similares a los de cartuchos y el elemento filtrante es el citado cartucho que puede tener una selectividad entre 5 y 10 micras.

Los abiertos consisten en un depósito de forma rectangular sobre el que se colocan una serie de elementos filtrantes, también de esta forma que quedan suspendidos en un bastidor. El agua filtrada de las distintas láminas se recoge en un colector que se conecta a la aspiración de una bomba. Por tanto en lugar de impulsarse en agua a presión sobre los elementos filtrantes, se aspira el agua a través de dichos elementos.

d) Microfiltración

Los equipos de microfiltración realizan una separación de partículas de hasta 0,1 micras. Las membranas que realizan esta separación están constituidas por un haz de fibras huecas de 2 mm de diámetro.

El agua pasa a través de las paredes sobre la que se depositan las partículas, y el alma central de la fibra constituye el colector o canal de recogida del agua producto. La acumulación de la suciedad del agua durante el funcionamiento origina la obstrucción de las fibras. Esta obstrucción deja al equipo fuera de servicio mientras se realiza su limpieza con agua y aire a contracorriente. Lo cual exige la existencia de un depósito regulador intermedio entre el equipo de microfiltración y equipo de desalación, pues su elevado coste impide disponer de un equipo de reserva que permita el funcionamiento en continuo. Aún en su forma más simple es un sistema enormemente caro que sólo en casos especiales como determinadas instalaciones de uso industrial, y menos frecuentemente en reutilización de aguas residuales justifican su instalación. El pequeño tamaño de los poros de estas membranas les permite además la retención de bacterias y buena parte de los virus.

e) Ultrafiltración

En este caso las membranas suelen ser de arrollamiento en espiral y se colocan dentro de un tubo de presión, generalmente en número no superior a tres. La separación se realiza a causa del tamaño del poro, siendo la selectividad de 0,01 micras.

Comercialmente se están desarrollando nuevas configuraciones para los módulos de ultrafiltración como lo son los de membrana almohadillada, compuesta por una placa, unos espaciadores a ambos lados de la placa para la circulación de permeado, y las membranas que envuelven la misma. La soldadura por ultrasonido garantiza la hermeticidad absoluta de estas membranas. Las membranas se apilan alternándose con los espaciadores de goma y el conjunto se soporta en las dos secciones de una carcasa cilíndrica. El permeado se evacua a través de dos tubos de drenaje situados en el centro de la pila de membranas, que se conectan con los colectores integrados en la carcasa interior, que a su vez conducen el permeado al exterior del módulo. Al igual que en el caso anterior sólo condiciones muy especiales justifican su uso.

5.3.2.3 Pretratamientos Químicos.

La composición química o la actividad biológica que se desarrolla en el agua, puede crear problemas a las membranas que hay que evitarlos. Para ello se necesita someter el agua a un pretratamiento químico.

Estos pretratamientos se utilizan para controlar fenómenos de contaminación del agua y procesos químicos que afectan a las membranas.

a) Incrustaciones – Inhibidores

El primer método para prevenir en OI el ensuciamiento por incrustaciones es la disminución de la potencial capacidad de precipitación de aquellas sales que puedan provocarlo con un aumento de la temperatura. Estas sales son principalmente el sulfato cálcico, sulfato bórico, sulfato estróncico y los bicarbonatos de calcio.

La inhibición se realiza mediante la dosificación de productos químicos que se agregan al agua que se va a tratar en cantidades muy pequeñas, consiguiendo aumentar la solubilidad de los distintos iones en el agua.

El control de la precipitación de estas sales se evita con la adición de ácido. El más económico es el ácido sulfúrico. Sin embargo hay que tener en cuenta que la adición de este ácido provoca un incremento en el contenido de sulfatos del agua inicial.

Otra forma de evitar la precipitación de los carbonatos, sulfatos, sílice es mediante la adición de un inhibidor llamado también dispersante, polímero o antiincrustante. Este tipo de sustancias actúa sobre la formación de los cristales, impidiendo su formación y manteniendo en sobresaturación en el agua los iones. Este método es el mayoritariamente utilizado bien sea individualmente o conjuntamente con el anterior.

Con ellos se puede por tanto aumentar la recuperación de la instalación y en consecuencia abaratar tanto la inversión en equipos como en gastos de funcionamiento.

Las dosificaciones óptimas son muy pequeñas en relación con las concentraciones de los cationes susceptibles de precipitación.

En las instalaciones de agua de mar no son tan necesarios dado que se opera con conversiones normalmente inferiores al 50%.

Entre los tratamientos más usuales tenemos:

- Fosfato coordinado: se utilizan mezclas proporcionadas de fosfato trisódico, disódico, metafosfato sódico o ácido fosfórico en calderas de alta presión y alta velocidad de transferencia de calor.
- Quelantes: se utilizan los ácidos etilendiamintetraacético (EDTA) y nitrilotriacético (NTA) cuya estabilidad depende de la temperatura, el pH, la presencia de gases oxidantes, las sales presentes, el tiempo de residencia y las puntas térmicas.
- Dispersantes: productos orgánicos que incluyen taninos, ligninas y almidones y otros tipos que evitan la formación de grandes precipitados cristalinos.

Para calcular los límites de utilización de estos productos se debe consultar con los fabricantes de los mismos, los cuáles nos indicarán en cada caso hasta donde garantizan, la concentración que se puede alcanzar y la temperatura, pues pueden hidrolizar y dejar de ser activos.

b) Materia en suspensión

Con el fin de evitar la materia suspendida y no disuelta en el agua, se procede a una filtración de esta materia. Para ello se emplean los filtros de arena y filtros de cartucho. No obstante, a veces es preciso utilizar antes un floculante que aglomere y flocule los coloides presentes y las partículas en suspensión. También a veces hay presencia de iones férricos y de metales pesados. Éstos precipitan con bastante facilidad en forma de hidróxidos, por lo que en el caso de que estén presentes hay que eliminarlos previamente por precipitación química. Los productos químicos más utilizados como agentes precipitantes son:

- Sulfato de aluminio: reacciona con el agua en medio débilmente ácido, neutro o débilmente alcalino, produciendo hidróxido de aluminio insoluble, floculo gelatinoso que, al sedimentar lentamente, arrastra consigo a las partículas en suspensión
- Sulfato ferroso: se utiliza como coagulante debido a la formación de un hidróxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) insoluble que forma un floculo gelatinoso y voluminoso de color rojo pardo, con acción coagulante similar a la del hidróxido de aluminio.
- Sales férricas: se utilizan los cloruros y los sulfatos. Desde valores de pH próximos a 2 hasta los de fuerte alcalinidad, el ión férrico precipita como hidróxido férrico insoluble, disminuyendo el pH del medio por lo que se puede hacer necesario añadir hidróxido sódico.

- Hidróxido cálcico: con su adición se sube el pH del agua hasta valores próximos a 12 de manera que su acción coagulante provenga de la formación de un precipitado de carbonato cálcico que flocula y decanta. Posteriormente se disminuirá el pH del agua mediante la adición de un ácido.

c) Ajuste de pH

El agua que se va a desalar tiene generalmente un pH elevado, sobre el valor de 8 en el caso del agua de mar. En estas condiciones el funcionamiento de la membrana no es el óptimo. La acidificación del agua de alimentación se emplea con dos objetivos:

- Colocar el agua a un pH óptimo para la membrana
- Prevenir la precipitación del carbonato cálcico, el cuál se forma por descomposición del bicarbonato cálcico.

Se usa por lo común el ácido sulfúrico, que elimina la alcalinidad del bicarbonato y previene la precipitación del carbonato. Pero además se incrementa la concentración del ión sulfato y la tendencia a la formación de precipitados de sulfato cálcico. Para evitar esto, se le agrega al agua aditivos antiincrustantes ya citados anteriormente.

En el caso de utilizar membranas de acetato de celulosa, que son fácilmente degradables, el ácido sulfúrico previene su hidrólisis a celulosa y ácido acético, que se produce rápidamente cuando se salen del estrecho margen de pH (5-6) a que pueden trabajar.

d) Control microbiológico - desinfección

Cuando hablamos de captaciones abiertas de agua de mar e incluso en ocasiones en pozos costeros es frecuente la presencia de materia orgánica, y en consecuencia una gran actividad biológica que antes o después afectará a las membranas, produciendo un ensuciamiento biológico en la superficie de la misma que se conoce con el nombre de *biofouling*.

La eliminación total de la materia orgánica resulta empresa bastante difícil, por lo que se sustituye por procesos alternativos en los que se añaden aditivos desinfectantes conocidos como biocidas de manera que se trate de evitar en el agua unas condiciones favorables para la proliferación de bacterias.

El biocida más importante es el cloro, pero también se utiliza el dióxido de cloro, el hipoclorito sódico, hipoclorito cálcico, ozono o rayos ultravioletas. También es posible usar biocidas no oxidantes como los fenoles clorados y compuestos organosulfurados, sales de amonio y la acroleína.

Otra forma de evitar su crecimiento aunque no su existencia, es la adición de los *biostáticos*, que son sustancias que sin atacar a la materia viva, impiden que sigan creciendo. Una de estas sustancias es el bisulfito sódico, el cuál actúa como reductor secuestrando oxígeno presente en el agua y haciendo imposible la vida para los seres aerobios.

En el caso de haber utilizado alguna forma de cloro para la desinfección del agua y dado que las membranas son muy sensibles al mismo, hay que evitar que llegue a éstas. Para ello se emplea también el bisulfito sódico, pero esta vez no como agente bioestático sino como reductor, ya que ataca al cloro residual eliminándolo.

En cuanto a la desinfección con ozono no depende del pH y se emplea en los casos de desinfección bacteriana y destrucción de virus. Pero además sus aplicaciones alcanzan más allá de la desinfección: mejora las características de decantación, elimina los sabores y olores del agua, elimina algas, sulfuros, cianuros...

Las radiaciones ultravioletas tienen poder bactericida y virucida y no contribuyen a la formación de subproductos. La principal ventaja de este método está en que no se necesitan productos químicos. Sin embargo el principal defecto está en que carece de acción desinfectante residual, siendo el agua tratada susceptible de volver a contaminarse. Su coste es por lo demás elevado, muy superior a los procedimientos químicos, por lo que no siempre se justifica su uso.

El ensuciamiento de las membranas obligará a detener la producción y realizar una adecuada limpieza de las mismas, hasta reestablecer en la medida de lo posible las condiciones de permeación y rechazo originales. El consumo energético específico aumenta como consecuencia de detener la producción para realizar el lavado de las membranas en donde también se consumen productos químicos para llevar a cabo esta operación de mantenimiento. Una posible consecuencia de todo esto, es que debido a la agresividad de los productos químicos utilizados durante la limpieza, la vida operativa de la membrana se reduzca.

En general, hace falta un buen conocimiento de la composición del agua que se va a utilizar, con el fin de prever todos los tratamientos que son precisos y diseñar correctamente la planta de desalación.

Por consiguiente, toda estrategia que conduzca a disminuir el ensuciamiento de las membranas generará beneficios económicos en el rendimiento de la instalación de RO.

5.3.2.4 Factores a tener en cuenta en el diseño del pretratamiento de aguas para OI.

Junto a los parámetros vistos anteriormente, a la hora de diseñar un pretratamiento para el agua de alimentación, que salvaguarde a las membranas de un ensuciamiento prematuro, se han de estudiar una serie de índices de carácter predictivo para el riesgo del ensuciamiento o "fouling" y de la deposición de sales o "scaling". Por tanto, estos índices serán claves para el diseño de un pretratamiento que reduzca al máximo los problemas de ensuciamiento de las membranas y las mantenga operativas, con los valores de producción de diseño durante el máximo tiempo posible.

a) Índice de saturación de Langelier (LSI)

El fenómeno de precipitación cristalina sobre las membranas, es lo que se ha denominado "scaling". La deposición en la membrana de un sistema de OI, puede ocurrir cuando se concentran las sales cerca de la superficie del elemento a niveles superiores a sus límites de

solubilidad. Esto es muy factible de ocurrir por el hecho de que las concentraciones aumentan en el agua de rechazo, especialmente cerca de la superficie del elemento. Entre las sales más comunes que pueden causar esto, se encuentran el CaSO_4 , CaCO_3 , CaF_2 , BaSO_4 , SrSO_4 y el sílice.

Este índice se puede definir como la diferencia entre el pH actual del agua y el pH en el que se produce el equilibrio entre el CaCO_3 disuelto y el CaCO_3 precipitado, para un agua de composición determinada (TDS conocido) y presión de CO_2 constante.

El índice de saturación de Langlier (*LSI*, por sus siglas en inglés) es muy utilizado en el diseño de sistemas OI para expresar el potencial de deposición del carbonato de calcio. Su valor dependerá de las siguientes características del agua de alimentación:

- Concentración de carbonato de calcio
- Total de Sólidos Disueltos (*TDS*)
- Alcalinidad
- pH
- Temperatura y recuperación.

Se aplica a las aguas que se consideran dulces y salobres (hasta 5000 ppm).

b) Índice de saturación de Stiff y Davis (*S + DSI*)

Se trata de otro índice para determinar el *scaling* potencial por CaCO_3 de un determinado tipo de agua y se utiliza para las aguas salinas y marinas (>5.000 ppm). Se determina de manera similar al anterior con alguna pequeña variación.

5.3.3 Post-Tratamiento.

5.3.3.1 Introducción

El agua osmotizada obtenida en el proceso OI debe ser sometida a un proceso de remineralización y ajuste de pH. Además, si esta agua va a ser almacenada en algún depósito, debe someterse también a un proceso de cloración, puesto que existe el riesgo de que pueda contaminarse biológicamente.

Este postratamiento deberá aportar calcio para reducir el alto índice de peligrosidad de sodio que pudiera tener el agua tratada. Se conseguirá además, aumentar el contenido de este ion y la alcalinidad del agua, reduciendo así el poder de corrosión.

Los procesos principales a los que se somete el agua desalada son el ajuste de pH y la post-cloración.

5.3.3.2 Ajuste de pH.

El agua desalada tiene un pH bajo (5,5), siendo de baja calidad y pobre en calcio debido al elevado rechazo de estos iones por las mismas. Es por tanto un agua desequilibrada.

Su baja alcalinidad y la presencia de CO_2 la hacen corrosiva, pudiendo disolver los precipitados de las tuberías e incluso incumplir algunos aspectos de la normativa técnico-sanitaria.

El CO_2 se forma por la reacción del sulfúrico con los bicarbonatos y pasa fácilmente a través de la membrana, acumulándose en el permeado. Para estabilizar esta agua hay que llevar estos parámetros a su equilibrio de saturación de CaCO_3 .

También en ocasiones suele contener SH_2 (sulfuro de hidrógeno), especialmente cuando se tratan aguas subterráneas. Por tanto hay que estabilizarla con respecto al CaCO_3 llevando el pH a 6,5-8 y posteriormente debe desinfectarse si se va a dedicar al abasto. La estabilización se puede conseguir por tres procedimientos distintos:

5.3.3.3 Descarbonatación o desgasificación.

Se realiza mediante una torre en la que el agua entra por la parte superior mediante unos difusores y percola a través de un material. Simultáneamente, se inyecta una corriente de gas distinto del que se pretende separar, a contracorriente que generalmente se trata de aire.

De esta forma se reduce el contenido de CO_2 y el pH queda en 6-6,5. También se pueden emplear torres de enfriamiento, difusión de aire, desgasificación por spray o desaireadores de vacío.

a) Adición de productos químicos

Generalmente se emplea la cal (CaCO_3), sosa caústica (NaOH) o soda ash (Na_2CO_3). El más adecuado es la dosificación de carbonato cálcico. La remineralización con este carbonato debe hacerse preferiblemente a la salida de los bastidores para aprovechar el CO_2 libre del agua recién osmotizada. Una excesiva dosificación de carbonato cálcico podría producir su precipitación.

Con los dos últimos productos, aunque el pH se estabiliza, la ausencia de calcio no garantiza que el agua no sea corrosiva, por lo que debe agregarse un inhibidor de la corrosión que proteja los materiales.

b) Mezcla con otras aguas

En este caso el agua desalada debe suponer al menos el 10% de la mezcla.

El postratamiento más adecuado es la dosificación de carbonato cálcico. La remineralización con carbonato cálcico debe hacerse preferiblemente a la salida de los bastidores para aprovechar el CO_2 libre del agua recién osmotizada.

La excesiva dosificación de carbonato cálcico puede producir su precipitación e incrustaciones.

La dosificación sólo con hidróxido cálcico es menos eficaz y produce rápidamente la sobresaturación y precipitación en forma de carbonato cálcico.

5.3.3.4 Post- cloración.

Con el agua que se va a desalar ha sido desprovista de sus características oxidantes mediante la dosificación de bisulfito sódico, en el producto no existe cloro residual. Normalmente, antes de su uso final, el agua suele almacenarse en algún depósito, existiendo el riesgo de que vuelva a contaminarse. Por ello, si el agua se va a dedicar a abastecimientos urbanos, es necesario volverla a clorar para cumplir la normativa sanitaria en cuanto a presencia de cloro residual en la red.

Los tres procedimientos de cloración más empleados en esta fase son:

- a) **Gas cloro:** Muy extendido en los abastecimientos, por su menor coste, cuando se trata de grandes caudales.
- b) **Hipoclorito sódico:** Es el procedimiento más barato tanto de implantación como de funcionamiento
- c) **Hipoclorito cálcico:** Tiene la ventaja de aportar calcio, que sirve para elevar el contenido de este elemento en el agua producto.

En ocasiones se puede intentar la carbonatación y cloración de una sola vez con la dosificación de cloruro cálcico. Este procedimiento se usa cuando el depósito principal de almacenamiento está alejado de la instalación desaladora y no dispone de personal, con lo que desde la propia planta se pueden realizar ambos post-tratamientos. La dosificación es más cara y menos precisa, sobre todo teniendo en cuenta que el agua puede estar almacenada en el depósito final períodos de tiempo relativamente largos.

5.3.4 Bomba de Alta Presión

5.3.4.1 Introducción

Las bombas de alta presión que se utilizan en el campo de la desalación, son el corazón de la planta de ósmosis inversa ya que impulsan la solución a tratar hacia las membranas a la presión requeridas por ésta. Es aquí donde se consume la mayor parte de la energía del proceso, por lo que la decisión del tipo de bomba a instalar tiene una gran importancia. A la hora de seleccionar las bombas hay que tener en cuenta distintos parámetros como su rendimiento, la inversión necesaria, el mantenimiento requerido, la disponibilidad, los niveles de ruido, las vibraciones, etc.

En el proceso de ósmosis inversa se utilizan generalmente dos tipos de bombas (Fariñas, 1999; Medina,1999, Kucera,2010):

- Centrifugas
- Alternativas o de desplazamiento positivo

La evaluación de los requisitos hidráulicos del sistema de bombeo de la instalación junto con el conocimiento del comportamiento y las características de funcionamiento de diferentes tipos de bombas permitirán realizar una selección adecuada de la bomba a instalar.

Por otro lado, con el creciente interés en el consumo de energía, se necesita un examen cuidadoso de cada situación para encontrar la bomba más eficiente. Dado que la planta OI que se quiere diseñar depende energéticamente de una fuente alternativa, el funcionamiento de la bomba de alta presión estará fluctuando en función de las disposiciones energéticas que se tengan. Por lo tanto, no siempre la bomba va actuar en condiciones de máxima eficiencia.

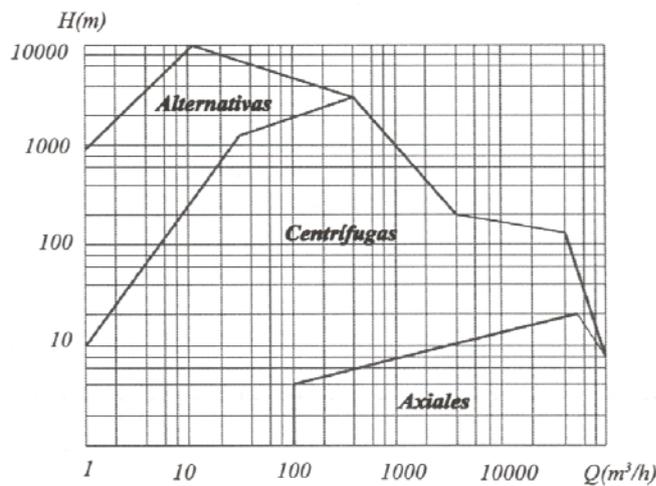


Figura 5.6 Campos de aplicación de los distintos tipos de bombas

5.3.4.2 Tipos de bombas

a) Bombas Centrifugas

Una bomba centrífuga en su concepción más simple consiste en un impulsor con álabes, llamado rodete, que gira en el interior de una carcasa accionado desde el exterior mediante un eje.

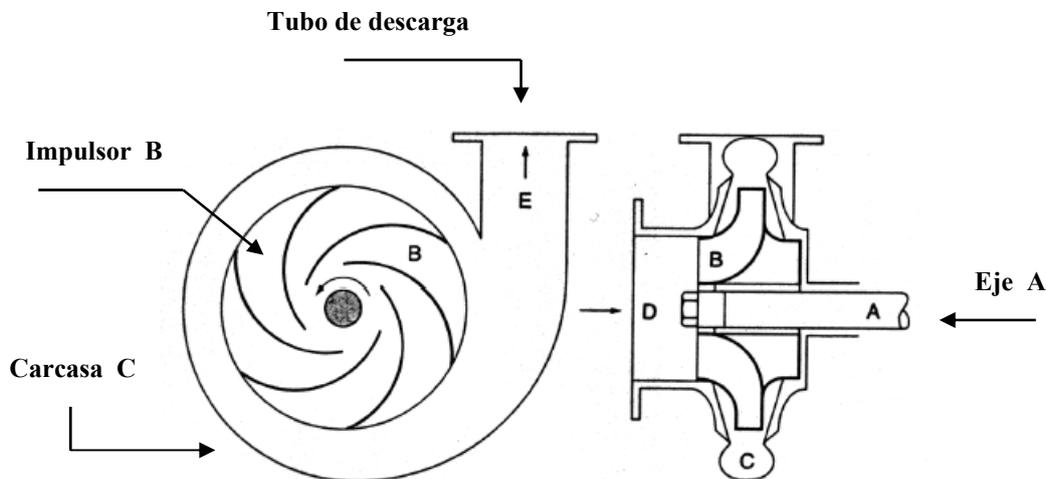


Figura 5.7 Bomba centrífuga

La energía de una fuente exterior aplicada al eje A, hace girar el impulsor B dentro de una carcasa estacionaria C. Los álabes del impulsor en rotación producen un descenso de la presión en la entrada de los mismos, lo que origina que el fluido se mueva hacia ellos desde la tubería de aspiración. El fluido, debido a la rotación del impulsor, es enviado hacia el exterior de los álabes aumentando su velocidad tangencial. La velocidad adquirida por el fluido cuando abandona los álabes, se transforma en presión cuando pasa al difusor saliendo al exterior a través del tubo de descarga E.

Por otro lado, cumplen con la ecuación de Euler, lo que implica que dependen de la densidad ρ del fluido y por lo tanto no son autocebantes.

Otras características relevantes de las bombas centrífugas son las siguientes:

- Se adaptan mejor a pequeñas P y grandes Q
- Su rendimiento $\eta\%$ es inferior al de otras bombas
- Tienen mayor fiabilidad
- Necesitan poco mantenimiento
- Se suele utilizar con ellas una válvula reguladora en la línea de descarga para controlar la P_{alim} (presión de alimentación) a los módulos de OI
- Su potencia específica (potencia por unidad de superficie o volumen) es mayor
- Carecen de fuerzas de inercia descompensantes y tienen un acoplamiento directo a los motores eléctricos de un número elevado de revoluciones

b) Bombas de desplazamiento positivo

Su funcionamiento se basa en el principio de desplazamiento positivo, es decir, recibe un volumen fijo de líquido en condiciones casi de succión, lo comprime a la presión de descarga y lo expulsa por la boca de descarga.

Es imprescindible instalar una válvula de seguridad en la descarga para proteger la instalación frente a cualquier sobrepresión accidental. Asimismo, pueden llevar también una válvula de aspiración.

Las características más importantes que definen a este tipo de bombas serían:

- Se adaptan mejor a elevadas P y pequeños Q.
- Tienen mejor rendimiento $\eta\%$ que las centrífugas.
- Son bombas más delicadas y necesitan una mayor vigilancia y mantenimiento en parte debido a las vibraciones a las que se ven sometidas en su funcionamiento. Debido a esto se recomienda la utilización de un amortiguador.
- Tienen un bajo consumo específico de energía. El consumo de las bombas de pistón es inferior al de las centrífugas, aunque por razones técnicas el uso de las primeras sólo es factible en plantas de OI de baja capacidad productiva.

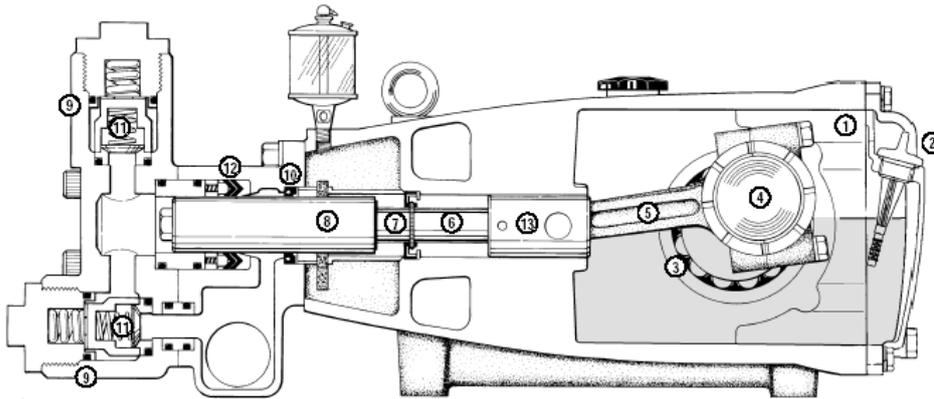


Figura 5.8 Sección transversal de una bomba de desplazamiento positivo

c) Estudio comparativo

Vistas las características principales de ambos tipos de bombas se debe decidir qué tipo de bomba es la más idónea para instalar en la planta OI. Para ello se realiza un pequeño estudio comparativo de ambos tipos bombas atendiendo a una serie de criterios en función de las necesidades de la planta OI. Estos son los siguientes:

1. El rendimiento de la bomba

Las bombas volumétricas tienen en general un rendimiento mayor que las bombas centrífugas y una elevada eficiencia mecánica.

Una bomba centrífuga, que es una máquina hidrodinámica, se diseña para un punto de funcionamiento máximo en capacidad y carga total. Si no se trabaja en ese punto, se reducirá considerablemente la eficiencia. Y esto será lo que va a ocurrir en una instalación que depende energéticamente de una fuente renovable. Dependiendo de la energía que se genere, se podrá o no, estar en el punto máximo de funcionamiento.

En este tipo de bombas la equivalente de la curva de rendimiento de una bomba centrífuga es la *gráfica para selección*. Consisten en líneas rectas porque el desplazamiento va en proporción directa con la velocidad.

2. El tamaño de la planta OI y el rango de unidades de operación.

Las bombas volumétricas suelen utilizarse en plantas de pequeño tamaño como lo es la instalación que se está estudiando.

Las bombas de pistones tienen un funcionamiento mejor y más estable cuando trabajan con caudales pequeños. En estas condiciones son capaces de alcanzar elevadas presiones de trabajo. Sin embargo, cuando hablamos de grandes caudales los problemas de vibraciones, mantenimiento y sus altos costes de adquisición les hace encontrarse en clara desventaja frente a la elección de una bomba centrífuga.

La planta que se pretende diseñar tiene una capacidad media de producción de agua de 100 m³/día. Esto quiere decir que se está hablando de una planta de pequeña capacidad en la cuál se justifica el empleo de una bomba de pistones. Puesto que se trabajará con un rango de

caudales pequeños, se prefiere la bomba volumétrica con la que además se alcanzarán rendimientos mayores.

Por otro lado, en la selección de la bomba se debe tener en cuenta que para ciertas aplicaciones industriales, se requieren las mismas presiones altas que en escalas mayores, aunque los caudales manejados son mucho menores. Este hecho reduce la gama disponible de bombas a las de desplazamiento positivo (en casos de grandes caudales se recomienda el uso de bombas centrífugas - multietapa - pues requieren menos mantenimientos y son más silenciosas). Otro factor a tener en cuenta para la selección, es el de estar manejando aguas saladas, lo que implica una viscosidad muy baja y resistencia a la corrosión. Las bombas en polímero disponibles en el mercado por lo general son de tipo centrífuga y manejan presiones no mayores 140 psi (9,7 bar). El rango de presiones que se maneja en la desalinización por ósmosis inversa es de 800 a 1000 psi (55 a 69 bar) en aguas de mar, y de 150 a 600 psi (10 a 41 bar) en aguas salobres.

3. La posibilidad de poder controlar la Presión y el Caudal independientemente.

La toma de captación de agua que posee la instalación es a través de un pozo costero. La salinidad de los pozos es normal que varíe con el paso del tiempo debido a diversas causas (cambio en las cantidades de sílice, manganeso...). La salinidad del agua es proporcional a la presión osmótica (Π_{memb}) de las membranas. Para la instalación de este proyecto, se necesita una bomba que impulse el mismo caudal de agua independiente de la presión que se tenga. Y precisamente esa es la teoría de funcionamiento de la bomba volumétrica. Es capaz de bombear la cantidad de agua que necesite la membrana adaptándose a la presión osmótica de la membrana. Si se observa en la curva característica de una bomba de pistones, estas dos magnitudes (P y Q) son prácticamente independientes.

Sin embargo, no ocurre lo mismo con una bomba centrífuga en donde la presión y el caudal están íntimamente ligados. De manera que si se pretenden conseguir elevadas presiones, se tendrán que bombear caudales pequeños y viceversa. En la figura se pueden observar las dos curvas de funcionamiento de ambos tipos de bombas:

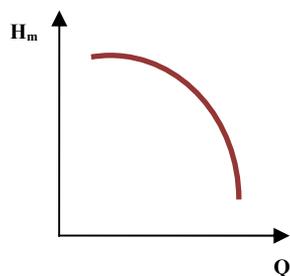


Figura 5.9 Curva de una bomba centrífuga

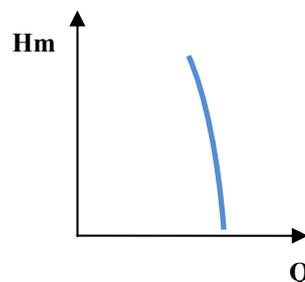


Figura 5.10 Curva de una bomba volumétrica

3. Los costes de adquisición y de mantenimiento

En este caso, una bomba centrífuga de las mismas características en cuanto al tamaño es más económica. Las bombas volumétricas tienen coste de mantenimiento mayor que las centrífugas debido a las pulsaciones aunque sin embargo permiten llegar a conseguir un bajo consumo específico de energía. Sin embargo, la bomba seleccionada fue escogida por las características que ofrece el fabricante de facilidad de mantenimiento, y por lo tanto reducción de los costos en este aspecto. Además se trata de una bomba que tiene una fácil accesibilidad a sus partes mecánicas de manera que en la operación de mantenimiento se reduzca tiempo y esfuerzo.

5.3.5 Circuitos de presión.

5.3.5.1 Introducción

La ósmosis inversa es un proceso en el que una parte importante de los costos de funcionamiento corresponden a la energía eléctrica consumida en el bombeo a alta presión. Con el fin de disminuir los costos de operación de la planta y por tanto el precio último del agua producto, se han incorporado una serie de mejoras tendentes a minimizar los consumos energéticos.

En la concepción más simple de una planta de ósmosis inversa, el fluido a tratar es aspirado por una bomba de alimentación que lo impulsa hacia el pretratamiento donde se elimina todo aquello que pueda ensuciar y deteriorar las membranas. A continuación, es impulsado por una de las bombas de alta presión que lo envía, a la presión necesaria, hacia las membranas de ósmosis inversa.

En el interior de los módulos, una parte del solvente (entre un 40 y un 90 % según el porcentaje de recuperación) atraviesa las membranas dando lugar al permeado que abandona los módulos a una presión comprendida entre 1 y 3 bar. El resto (entre un 60 y un 10 % del caudal inicial), junto con las sales y sustancias rechazadas por las membranas, abandona los módulos a una presión ligeramente inferior a la que tenía a la entrada a los mismos, dando lugar a la corriente de rechazo.

Para poder mantener la presión de trabajo en el interior de los módulos es necesario colocar una válvula de control que cree la pérdida de carga necesaria en el rechazo de la ósmosis inversa, laminándolo y disipando su energía en forma de calor.

Una concepción más avanzada de la planta incorpora un sistema que permite recuperar la energía que, en forma de presión, posee el rechazo a la salida de los módulos. Son lo que se denominan recuperadores de energía. Como ya se ha señalado, dado el entorno económico en que nos movemos, para que esta innovación pueda introducirse es preciso que el ahorro económico que comporte compense la mayor inversión a realizar.

5.3.5.2 Válvulas de regulación

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida, comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro de este bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, transmisor o controlador.

Como la bomba que se instala en la planta piloto es volumétrica, es importante la instalación de una válvula rechazo que permita el control del caudal, sin que intervenga en este control la variable presión (que se controla mediante el motor que lleva acoplada la bomba).



Figura 5.11 Válvula de rechazo de salmuera

5.3.5.3 Recuperadores de energía

Se ha dicho que la salmuera puede aprovecharse y utilizarse para recuperar la energía hidráulica que contiene, antes de evacuarla de la instalación. La energía que se puede recuperar es función de dos parámetros:

- Caudal de rechazo
- Presión de funcionamiento de la instalación

Cuanto más elevados sean ambos parámetros, mayor será la recuperación de energía. En consecuencia, las instalaciones de agua de mar, en que las recuperaciones son menores (35-50%) y las presiones de funcionamiento elevadas ($58-75 \text{ kg/cm}^2$), son las más idóneas para la utilización de elementos de recuperación de energía. En estas circunstancias puede recuperarse un 30-40% de la energía necesaria para el proceso.

Los equipos más utilizados para la recuperación de energía en las instalaciones de ósmosis inversa son los siguientes:

- Bombas Invertidas o Turbinas de Contrapresión
- Turbinas Pelton
- Turbo-charger
- Turbobombas compactas
- Intercambiadores de presión
- Bomba Clark
- Intercambiador RO Kinetic

Bombas Invertidas o Turbinas de Contrapresión

Las turbinas de contrapresión son bombas centrífugas que se han modificado tanto mecánicamente para que trabajen girando en sentido inverso, como hidráulicamente para funcionar con un flujo circulando en sentido contrario. Por este motivo también reciben el nombre de "bombas invertidas".

El rechazo de la ósmosis inversa se introduce en la descarga de una bomba centrífuga previamente modificada y adaptada, de forma que la presión que posee se transforme en los rodets en energía de rotación disponible en el eje, tras lo cual sale al exterior a través de la antigua tubuladura de aspiración que ahora pasa a ser la de descarga. Pueden trabajar como turbinas de contrapresión tanto las bombas de segmentos como las de cámara partida.

Turbinas Pelton

En una máquina de este tipo, también denominada turbina de impulsión, la presión que posee el rechazo de la ósmosis inversa se transforma en energía cinética en forma de un chorro líquido a alta velocidad. Para ello el rechazo se hace pasar a través de un inyector consistente en una tobera provista de una aguja que regula la sección de salida y, por tanto, la velocidad del chorro. El inyector dirige el chorro líquido tangencialmente sobre una rueda provista de álabes en forma de dos cucharas unidas por el borde. La rueda gira impulsada por el chorro líquido transformando la energía cinética del chorro en energía de rotación. El chorro líquido, tras golpear la rueda, se recoge a un nivel más bajo que ésta, a la presión atmosférica.

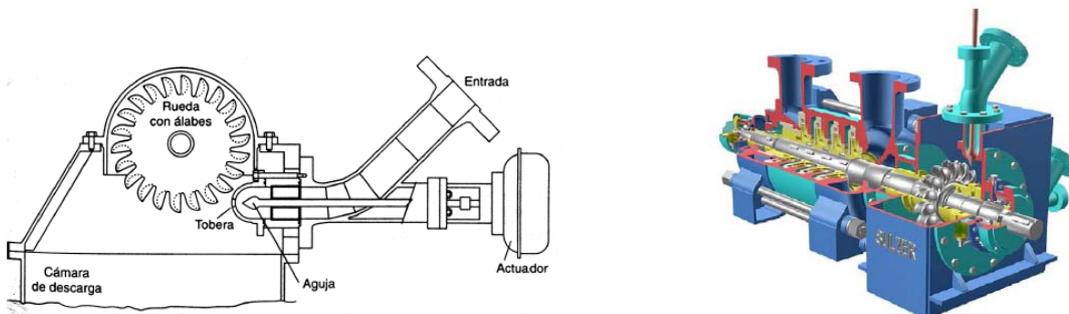


Figura 5.12 A la izquierda se muestra una representación esquemática de una turbina Pelton. En la parte derecha se muestra un equipo bomba-turbina de eje solidario

Las turbinas Pelton se diseñan para trabajar a 1.500, 1.800, 3.000 y 3.600 rpm por lo que las distintas posibilidades de montaje de una turbina de esta naturaleza son:

a) Acoplada a una bomba de desplazamiento positiva

Generalmente las bombas de desplazamiento positivo trabajan a bajas revoluciones estando conectadas con el motor de accionamiento mediante un sistema de poleas o a través de un variador.

En este caso la turbina suele acoplarse directamente al motor a través de una prolongación del eje de éste. A veces la turbina se acopla al motor de accionamiento también mediante poleas para poder instalarla en una posición elevada facilitando así la evacuación del rechazo.

b) Acoplada a una bomba centrífuga multietápica

Las bombas centrífugas multietápicas, tanto de segmentos como de cámara partida, están unidas directamente al motor mediante un acoplamiento elástico, girando bomba y motor a las mismas revoluciones.

En este caso la turbina se acopla también a una prolongación del eje del motor bien mediante un acoplamiento elástico o mediante un sistema de poleas y correas trapezoidales cuando se quiere instalar en una posición elevada. La turbina Pelton también puede montarse entre la bomba y el motor.

c) Acoplada a un generador eléctrico

En determinadas situaciones, cuando la planta de ósmosis inversa está compuesta por varias líneas de producción y el porcentaje global de recuperación es elevado, el caudal de rechazo obtenido en cada línea no justifica dotar a cada bomba de una turbina. En tal caso suele instalarse una única turbina acoplada a un generador eléctrico.

Las turbinas Pelton recuperan energía desde el instante en que, tras presurizarse las tuberías, el inyector produce el chorro que mueve la rueda. Adicionalmente, mientras la turbina funciona en seco no consume más energía que la debida al rozamiento. Por ambas circunstancias no es necesario instalar un embrague entre el motor y la turbina que acople esta última en los arranques cuando se haya alcanzado la velocidad de régimen.

La potencia suministrada por el motor eléctrico que acciona la bomba de alta presión a la que está acoplada la turbina, es igual a la diferencia entre la absorbida por la bomba y la recuperada por la turbina. A este valor se le llama "potencia neta". Consecuentemente, no es necesario que la potencia del motor sea superior a la absorbida por la bomba, es suficiente que sea un 20 % superior a la potencia neta.

Los sistemas de recuperación de energía operan en condiciones más duras que las bombas de alta presión. Las presiones en ambos equipos son similares pero los sistemas de recuperación trabajan con soluciones mucho más concentradas en sales, estando muchas veces sobresaturadas. El rechazo de la ósmosis inversa suele contener CO₂ en disolución debido a

la corrección del pH realizada durante el pretratamiento. Este gas tiende a desprenderse de la salmuera cuando la presión del rechazo disminuye. En el caso de las turbinas Pelton hay que tener muy en cuenta esta circunstancia. Las averías que suelen producirse con mayor frecuencia en este tipo de máquinas son:

- Rotura por fatiga en el punto de unión del álabe con la rueda debido al empuje radial cíclico que se produce sobre el álabe.
- Abrasión y/o corrosión de los álabes por la alta velocidad del rechazo y su elevado contenido en sales, pudiendo incluso encontrarse a veces en sobresaturación.
- Rotura por fatiga de flexión del eje de la rueda.

Turbocharger

Se trata de un equipo que combina en una sola unidad bomba y turbina. Este dispositivo lo que hace es transferir la energía de una corriente de líquido a otra corriente de líquido distinto. Luego por no estar unido a ningún motor como las otras turbinas, puede instalarse en distintos puntos del circuito de una instalación de ósmosis inversa.

Consta de una sección de bomba y otra de turbina, provistas cada una de un impulsor y compartiendo un eje común.

Para regular el caudal de salmuera y la presión está provisto de dos inyectores y una válvula de control, lo que evita el by-pass o la válvula de desahogo. De esta forma se aprovecha completamente el caudal de salmuera a presión.

El arranque de la instalación se realiza como si no se dispusiera de turbina de recuperación. La válvula auxiliar de control de la salmuera se maneja como una válvula normal de control de presión de la salmuera, para aliviar la carga de arranque que dé la bomba, y durante la operación, para controlar el caudal y presión de la salmuera. El equipo resulta especialmente adecuado para instalaciones de pequeña capacidad.

En el siguiente ejemplo, se puede observar como la introducción de este dispositivo hace reducir el tamaño de diseño de la bomba de alimentación, así como el coste energético que genera la misma.

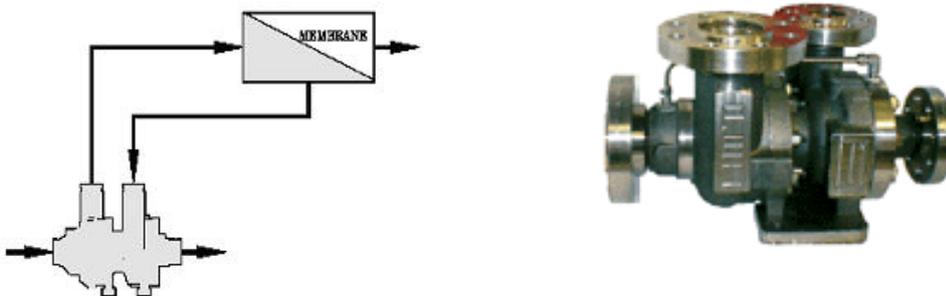


Figura 5.13 Turbocharger implementado

Obsérvese la gráfica de la figura 5.14 en donde se comparan los rendimientos de tres de los dispositivos recuperadores vistos hasta ahora. Se compara una turbina Pelton, una bomba invertida y un turbocharger.

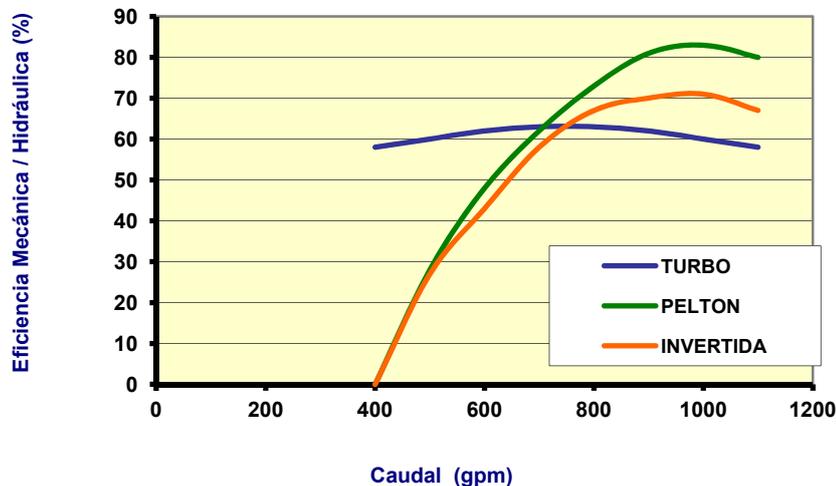


Figura 5.14 Curvas de eficiencia

Turbobombas compactas

Fueron quizás las primeras utilizadas en este tipo de instalaciones, y consisten en una bomba centrífuga de alta presión y una turbina, ambas multietápicas integradas en una carcasa única. Son unidades muy compactas y por tanto de tamaño reducido, pero muy revolucionadas (6000 rpm), por lo que pueden presentar problemas de mantenimiento y averías importantes. Sus capacidades son asimismo limitadas, por lo que sólo se utilizan para módulos de tamaño medio.

Los colectores de aspiración e impulsión de cada una de ellas están conectados directamente entre sí. El eje de ambas unidades es único y conecta con el eje del motor de impulsión. Hoy en día están siendo sustituidas por otros dispositivos que ofrecen mayores garantías.

Intercambiador de Presión

Se trata de un dispositivo que permite aumentar la eficiencia de la planta desaladora, llegando a obtenerse un consumo energético global por debajo de 2,4 kWh/m³ de agua producto.

Al presurizar una fracción del agua de alimentación, la bomba de alta presión puede reducirse hasta un 60%. Esto no sólo ahorra en consumo energético, sino también en el coste de la inversión de los equipos.

La tecnología del intercambiador de presión PX aplicada a la ósmosis inversa es diferente a la recuperación de energía convencional, aunque en la práctica es muy sencillo.

El agua de rechazo de las membranas de ósmosis inversa pasa a la unidad PX, donde su presión energética es transferida directamente a parte del agua de alimentación con una eficiencia que puede llegar a superar el 95%. Este caudal de agua de alimentación, que es casi igual al del rechazo, pasa por una bomba booster para compensar las pérdidas hidráulicas en tuberías y membranas. El caudal de agua de mar se junta con el que sale de la bomba de alta presión, pero no pasa por la bomba de alta presión. Esto es muy significativo porque la bomba de alta presión se tiene que dimensionar para bombear un caudal igual al volumen del permeado, no para el caudal de alimentación.

En una planta típica de desalación de agua de mar, la bomba de alta presión proporciona el 41% de la energía total, la booster proporciona un 2% y el sistema PX el 57% restante. Ya que el sistema PX no usa energía del exterior, el ahorro total de energía, comparado con un sistema sin recuperación de energía, es del 57%. El ahorro energético que se obtiene al reducir el tamaño de la bomba de alta presión a menos de la mitad, puede pagar la adquisición e instalación de estos intercambiadores.

El intercambiador de presión PX utiliza el principio del desplazamiento positivo para presurizar el agua de mar con el contacto directo de la salmuera procedente de la planta de ósmosis inversa.

La figura 5.15 muestra una sección longitudinal del dispositivo. Se observa que el sistema PX sólo tiene una parte móvil, un rotor cilíndrico y cerámico (óxido de aluminio), con una serie de conductos longitudinales paralelos a su eje para transmitir la energía de la presión de la corriente de salmuera a la corriente de alimentación. El rotor efectúa el intercambio de presión de la salmuera al agua de mar a través de un desplazamiento en contacto directo con pérdidas mínimas.

Al contrario que otros sistemas, el PX no necesita válvulas ni pistones. Debido a la precisión del rotor y al tiempo de residencia tan pequeño, hay una mezcla insignificante entre la salmuera y el agua de mar. Estos dispositivos tienen sólo una parte móvil y ningún sello mecánico. Dada su simplicidad de diseño no requieren prácticamente ningún mantenimiento. Las reducidas dimensiones le confieren una gran flexibilidad a la hora de la instalación. Puede agregarse fácilmente a cualquier tren de una planta de ósmosis inversa.



Figura 5.15 Sección longitudinal del intercambiador de presión PX

La secuencia de funcionamiento del PX es la descrita a continuación:

- Comienza el ciclo de llenado de la tobera con agua de mar. En este instante, la tobera contiene salmuera de alta presión y un volumen muerto que actúa como un pistón líquido. A medida que gira el rotor, pasando por el área donde no hay ninguna abertura y llegando al área donde se introduce el agua de mar a baja presión, la tobera se despresuriza por un extremo y empieza a llenarse con agua de mar de baja presión por el otro (flecha azul). A medida que se llena la tobera, la salmuera que ha perdido su presión es expelida de la tobera y sale por el centro del rotor, emergiendo de la unidad.
- El ciclo de llenado de agua de mar se completa. Casi toda la salmuera ha salido y el volumen muerto se ha desplazado a la parte superior de la tobera.
- Empieza el ciclo del llenado de la tobera con salmuera. En cuanto la tobera haya rotado y pasado por el área de sellado se presuriza a la presión de la salmuera y ésta empieza a llenar la tobera.
- A medida que la tobera se llena con salmuera, el agua de mar es expelida a alta presión.
- La tobera se aproxima al final del ciclo de llenado de la tobera con salmuera. La mayoría del agua de mar ha sido expelida a alta presión y el volumen muerto se encuentra cerca de la parte inferior la tobera.

Bomba Clark

Las turbinas Pelton o los intercambiadores de presión PX no están disponibles para instalaciones a pequeña escala. Sin embargo, los pequeños sistemas de OI pueden ser diseñados con mecanismos recuperadores de energía.

La Bomba Clark o Spectra Clark Pump es un nuevo dispositivo de recuperación de la energía proveniente del rechazo. Se utiliza en plantas de pequeña escala en donde son utilizadas membranas de arrollamiento en espiral de agua de mar de 2,5 y 4 pulgadas.

Recupera la energía mecánica que proviene del caudal de rechazo o salmuera y vierte directamente esa energía al caudal de alimentación.

El mecanismo básico del Clark se muestra en la figura.

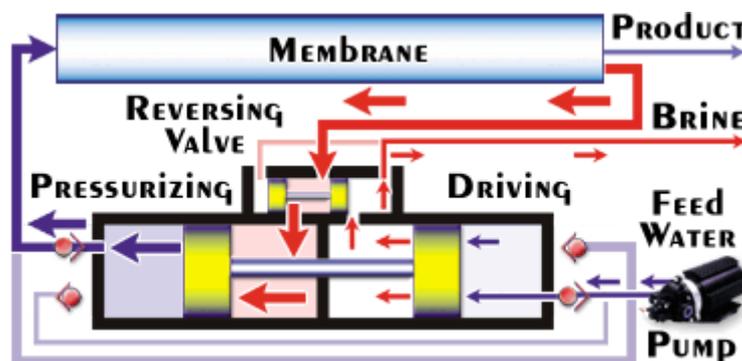


Figura 5.16 Funcionamiento de la bomba Clark

Los 2 pistones solidariamente conectados por la barra se encuentran dentro de un cuerpo cilíndrico. En un instante la presión intermedia del agua de alimentación junto con la presión del rechazo empujan el pistón hacia la derecha. Al final del recorrido de la carrera del pistón, las aberturas se invierten y el pistón regresa hacia la izquierda repitiéndose el proceso pero esta vez a la inversa.

Intercambiador RO Kinetic

El sistema RO KINETIC se basa en el anteriormente mencionado principio de desplazamiento positivo, lo que lo sitúa dentro de los equipos de mayor eficiencia en la recuperación energética.



Figura 5.17 RO Kinetic

Su funcionamiento permite que a través de sus dos cámaras en forma de anillo cerrado, circule la corriente de salmuera y la de agua de alimentación y se transmitan la energía de la presión cada cierto intervalo de tiempo, dependiendo éste del volumen físico del equipo. Dicho intercambio se realiza de forma inmediata, por lo que, en cierta medida, no existe interrupción en la circulación de ambos fluidos, permaneciendo constante la energía cinética.

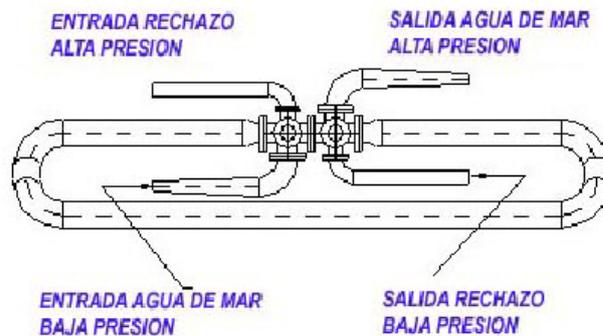


Figura 5.18 Colectores de entrada y salida de los flujos de agua que intervienen en el proceso de recuperación de energía en el RO Kinetic

Dicho funcionamiento alternativo se asemeja, en cierto modo, al del ERI, ya que ambos presentan una zona de volumen muerto en la que se produce un pequeño factor de mezcla. De igual forma, en el caso de la bomba de alta presión, ésta solamente tendrá que bombear la cantidad equivalente al caudal de permeado, por lo que no solo constituye ahorro energético, sino que además disminuye la dimensión del equipo, con el consiguiente ahorro económico. Asimismo, para compensar las pérdidas de carga producidas por las membranas, así como por el propio intercambiador de presión, el sistema deberá disponer de una bomba auxiliar denominada booster, que iguale las presiones con las de la bomba de alta presión.

Comparación energética entre equipos recuperadores de energía

Empíricamente y gracias a los datos suministrados por los diferentes fabricantes de los equipos analizados, se muestra la siguiente gráfica que compara las eficiencias con los dimensionamientos de la instalación en función del caudal de producción. Se puede observar que si bien los sistemas ERI y RO KINETIC se adaptan perfectamente a las variaciones en caudal de diseño, los otros equipos dependen mucho de sus puntos óptimos de funcionamiento.

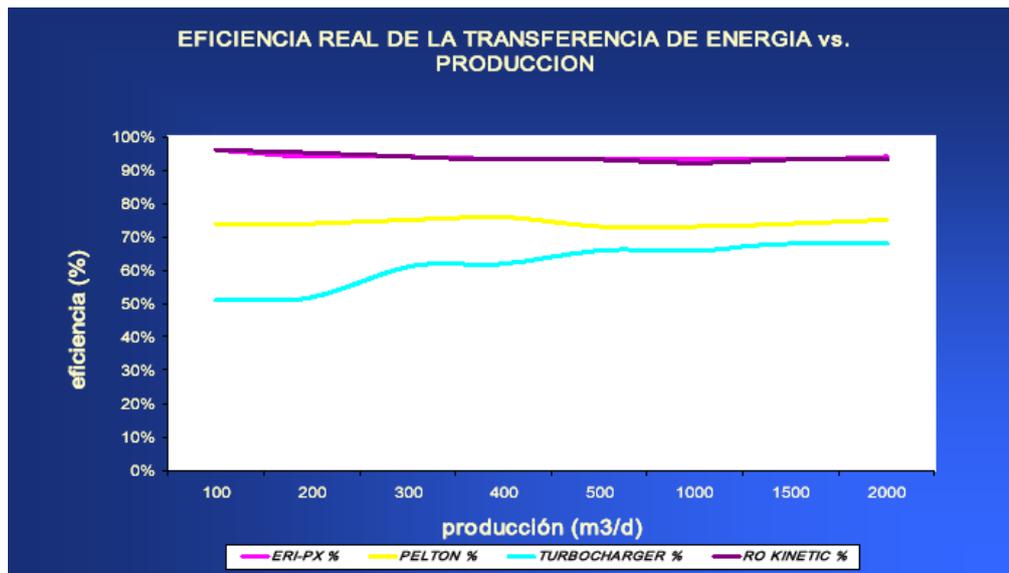


Figura 5.19 Comparación entre distintos equipos de recuperación de energía

Por otro lado, otra forma de poder tener una idea del funcionamiento y el rendimiento que se puede obtener de estos dispositivos, es saber el coste energético que tiene la producción de 1 m³ de agua.

Según un reciente estudio realizado recientemente, se compararon cuatro sistemas recuperadores de energía en varias plantas de distintos tamaños, obteniéndose el coste energético del m³ de agua producida. El estudio plasma los siguientes resultados que se observan en la tabla 11.1

PRODUCCIÓN (m ³ /día)	300	300	1000	1000	6000	6000
Recuperación (%)	45	35	45	35	45	35
Fedco Turbocharger, kWh/m ³	3,25	3,92	3,57	4,29	XXX	XXX
Calder Pelton, kWh/m ³	2,97	3,35	3,68	4,26	3,04	3,34
ERI PX, kWh/m ³	2,51	2,67	2,44	2,59	2,61	2,74
Desalco work exchanger, kWh/m ³	XXX	XXX	2,53	2,70	2,60	2,70

Tabla 5.7 Comparación energética de dispositivos de recuperación. Extraída de un estudio hecho por Irving Moch Jr. De I. Moch & Associates y Chip Harris de Advanced Membrane Systems

A la vista de los resultados expuestos, se puede tener una idea del sistema de recuperación que interesaría colocar en una planta OI dependiendo del tamaño que ésta tuviera.

5.3.5.4 Ventajas y desventajas de colocar un sistema recuperador de energía en instalaciones OI energéticamente autónomas

Está claro que en las plantas OI que están conectadas a la red eléctrica se justifica y además es necesaria la instalación de este tipo de dispositivos recuperadores de energía, los cuáles repercuten decisivamente en una disminución en los costes de producción del m³ de agua producto. Cuando se decide instalar un recuperador de energía, lo que se determina es su punto óptimo de funcionamiento en el diagrama de la instalación. Esto es posible, gracias a que la planta está funcionando en todo momento en un régimen estable de energía.

Sin embargo, cuando hablamos de plantas OI que dependen exclusivamente de la energía producida por un sistema de energía renovables (Fotovoltaica, Solar, Eólica), el planteamiento cambia. Debido a que este tipo de energías es fluctuante y depende de una serie de factores medioambientales totalmente ajenos al control humano, no se puede asegurar que la generación de energía sea siempre constante. Por lo tanto, aunque se calcule la instalación de un dispositivo recuperador de energía para que funcione en un punto óptimo de eficiencia, este equipo recuperador de energía, no siempre va a estar trabajando en este estado. Por tanto, puede que no se obtengan los resultados esperados de ahorro energético.

Además de esto, se estarán introduciendo dispositivos que pueden ser causa de posibles fallos en el funcionamiento de la planta, y sin embargo no están siendo aprovechados. Esta es la razón por la que no es adecuada la opción de instalar Turbinas Pelton, Bombas Invertidas o Turbocharger.

En cuanto al caso del intercambiador PX, ocurre que su diseño está hecho para que su funcionamiento se active a partir de los 2 m³/h. Sin embargo, tratándose de energía renovable, no se puede asegurar que siempre se obtenga la energía suficiente como para estar tratando con este rango de flujo. Por lo que es otra opción que se desecha, puesto que puede haber

momentos en los que el PX esté sin actuar y provoque fallos en el normal funcionamiento de la instalación.

El caso de la Bomba Clark es distinto. Este dispositivo sí está concebido para funcionar con este tipo de instalaciones. Y los resultados que se han obtenido de la experimentación han sido excelentes como se ha visto anteriormente. Sin embargo, se trata de un dispositivo para instalaciones a muy pequeñas escalas, como por ejemplo la instalación que podrían llevar las embarcaciones de recreo. Esto implica el moverse en un rango de caudales de entre 0,15 – 0,8 m³/h. Evidentemente se está hablando de valores muy inferiores a los que se tratan en este proyecto. En el presente se maneja un rango aproximadamente de 1,5 – 5 m³/h. Con lo que, aunque se ha de admitir que es una excelente opción, no se puede instalar puesto que no es viable técnicamente para nuestra instalación.

No obstante, puede que haya una solución ventajosa en instalar alguno de estos dispositivos en una planta OI autónoma.

Efectivamente, existe la posibilidad de instalar una turbina Pelton que acoplada a un generador eléctrico, permita volcar esa energía que proviene del flujo de rechazo, para inyectársela a un variador de velocidad que va a ser el que esté en todo momento gobernando la bomba de alta presión.

La razón de acoplar un variador de velocidad a la bomba de alta presión se justifica en base a las condiciones de potencia variables a las que se verá sometida la planta en funcionamiento con fuentes energéticas no convencionales.

Puesto que la bomba estará funcionando según las disponibilidades energéticas de las que se tengan en cada momento, la mejor forma de optimizar el funcionamiento de la misma, es acoplarle el variador de frecuencia que adecuará en todo momento el funcionamiento de la bomba. Con ello se consigue mejorar el rendimiento energético de la instalación. Ahora bien, ese variador de velocidad requiere de una energía para funcionar. Esta energía podría obtenerse de un generador eléctrico que estuviese acoplado a una rueda Pelton que aprovechara la energía que posee el rechazo.

Pues bien, esta es una solución que se plantea como mejora del rendimiento energético total de la instalación. La colocación de una turbina Pelton acoplada a un generador que alimente al variador de velocidad que tiene la bomba de alta presión.

5.3.6 Instrumentación, control y auxiliares

Aparte de los elementos mencionados existen otros componentes no menos indispensables para un correcto funcionamiento del proceso de desalación. Estos son:

- Válvulas (todo/nada, reguladoras de presión, antirretorno, etc), tuberías (PVC, acero inoxidable, etc), depósitos (productos químicos, agua producida, etc.)
- Medidores (presión, pH, conductividad, temperatura, caudales)

En cuanto al control de una planta de ósmosis inversa, éste varía desde instrumentación automática y control con microprocesador, hasta plantas que tienen los mínimos elementos indispensables controlados manualmente.

En orden a disponer en cada momento de una completa información del funcionamiento de una planta, es necesario el control de determinados parámetros:

- Conductividad (alimentación y producto)
- Caudales (alimentación, producto y rechazo)
- pH (alimentación y producto)
- Temperatura (alimentación)
- Turbidez (alimentación)
- Presiones (entre filtros, rechazo, alimentación, etc.)

Por lo tanto una planta debe de, como mínimo, mantener los dispositivos suficientes para controlar los parámetros anteriormente indicados.

5.4 Operación de las plantas de ósmosis inversa

5.4.1 Termodinámica del proceso

Consideremos un dispositivo como el indicado en la figura 5.20, donde tenemos dos recipientes separados por una membrana semipermeable. En el recipiente 1 tenemos una mezcla de dos gases ideales que nombramos A y B, y en el recipiente 2 tenemos el gas ideal A puro, permeable a la membrana; mientras que la membrana es impermeable al componente B.

Bajo condiciones de equilibrio ocurre que la presión parcial del componente que puede pasar a través de la membrana es igual en ambos compartimientos, es decir,

$$P_{2A} = P_{1A}$$

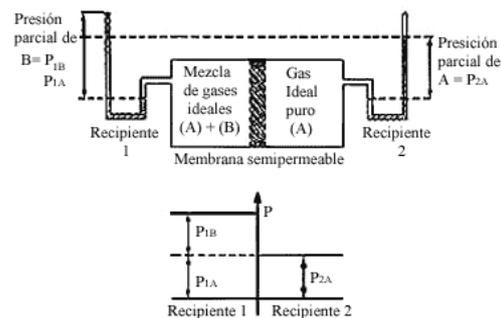


Figura 5.20: Esquema termodinámico de la ósmosis inversa.

En este caso, en el recipiente 1 tenemos un exceso de presión causado por el componente B. Este exceso de presión no es observado en el gas del recipiente 2, porque de alguna manera es compensado por la membrana al impedir el libre tránsito del componente B. En efecto, en un balance de presiones es la membrana la que contrarresta los efectos del componente que no puede pasar y así se estima la función de la membrana. De manera que si observamos los

manómetros del dispositivo experimental, el sistema conserva su equilibrio, acusando una diferencia de presiones. En este caso, nótese cómo la presión osmótica es la presión parcial del componente que no puede pasar a través de la membrana

$$\pi = P_{1B}$$

A este efecto, algunos autores suelen llamarlo "efecto de manómetro", porque son éstos los que señalan la diferencia de presiones cuando el sistema está en equilibrio. Este hecho tiene una consecuencia importante cuando el sistema está fuera del equilibrio, puesto que la diferencia de presión del componente que puede pasar no será igual a la diferencia de presión registrada por los manómetros.

Si consideramos,

Δp , diferencia de presión a ambos lados de la membrana (medida), entonces, $\Delta p - \pi$, es la caída de presión del componente que puede pasar a través de la membrana.

La corrección a la presión medida (Δp) por la presión osmótica (π) es para evitar el exceso de presión del componente que no puede pasar y que los manómetros registran, aunque sin importancia en el flujo a través de la membrana. El efecto de manómetro nos hace considerar la naturaleza del flujo osmótico, ya que en la explicación que hemos dado con gases ideales se indica que la presión osmótica aparece como una corrección entre una predicción teórica y su ajuste experimental. Asimismo, observaremos a continuación que el dispositivo empleado con gases ideales no indica a simple vista la causa del flujo osmótico.

Si consideramos que el dispositivo experimental de la figura no se encuentra en equilibrio, es decir

$$P_{2A} \neq P_{1A}$$

entonces, se obtendrá un flujo de la especie A (que puede transitar libremente a través de la membrana), producido por la diferencia entre las presiones P_{2A} y P_{1A} . Ahora demostraremos que este flujo no es osmótico. La demostración es muy simple, porque en un gas ideal la presión parcial es proporcional a la concentración, de manera que el flujo es causado por una diferencia de concentraciones de la especie A, a través de la membrana, y bien se sabe que es un flujo de difusión que se ajusta a la Ley de Fick de la difusión. Por lo que respecta al flujo osmótico es no difusivo y equivalente al causado por una diferencia de presiones. En nuestro caso, en un estado de no equilibrio, además del flujo difusivo del componente A, observaríamos un flujo del mismo componente A causado por $\pi = P_{1B}$. Para observar de dónde surge este término en nuestras ecuaciones, es necesario utilizar el formalismo completo de la teoría cinética de Boltzmann, para encontrar que, en efecto, es la presión osmótica de los componentes por lo que no pueden pasar por la membrana, y son los que producen el flujo osmótico. Pero este término aparece junto al que origina el flujo viscoso. Es decir, el flujo osmótico puede interpretarse como un flujo viscoso, producido por los movimientos térmicos moleculares cuando son interrumpidos por una pared porosa (membrana).

A continuación se explica la teoría termodinámica de la presión osmótica y sus aspectos experimentales.

Anteriormente habíamos deducido que,

$$\pi = P_{1B} \quad (V.1)$$

Y también que la condición de equilibrio del gas que puede pasar hacia ambos lados de a membrana está representada por la igualdad de las presiones parciales del gas A.

$$P_{2A} = P_{1A} \quad (V.2)$$

La sencillez de las ecuaciones (V.1) y (V.2) se establece por tratarse de gases ideales; evidentemente dejan de ser válidas para cualquier caso que se presente en la naturaleza cuando no sean gases diluidos.

Sin embargo, el esquema fisicoquímico de los gases ideales se preserva en general para cualquier sustancia, si se reemplaza la presión parcial de un componente por el respectivo potencial químico, multiplicado por su concentración. En tal caso y en general usaremos:

$$\text{(para el soluto)} \quad \pi = \Delta P = C_B \mu_{B1} \quad (V.3)$$

$$\text{(para el solvente)} \quad \mu_{A1} = \mu_{A2} \quad (V.4)$$

donde, Δp es la diferencia de presiones en ambos lados de la membrana, $\mu_{B1}, \mu_{A1}, \mu_{A2}$ representan los potenciales químicos de los componentes B y A respectivamente, así como C_B su concentración.

Las ecuaciones (V.3) y (V.4) representan las condiciones generales del equilibrio entre un solvente y un soluto a través de una membrana semipermeable y no representan ecuaciones independientes, ya que básicamente contienen la misma información. Esto significa que tendremos el mismo valor de la presión osmótica en cada una de las ecuaciones, lo cual se debe a que, en una situación de equilibrio, el cambio de presión es compensado por medio del efecto de las concentraciones, de manera que se cumpla la igualdad de los potenciales químicos. De aquí se entenderá el papel central que juega el concepto de presión osmótica en las ecuaciones termodinámicas.

Ahora bien, si el sistema se encuentra fuera de equilibrio, las ecuaciones (V.3) y (V.4) no tienen la misma información, en vista de que

$$\Delta p \neq \pi \quad (V.5)$$

y en tal caso se hallan las desigualdades siguientes

$$C_B \Delta \mu_B \neq \Delta p \quad (V.6)$$

$$\Delta \mu_A \neq 0 \quad (V.7)$$

La respuesta del sistema fuera de equilibrio es producir un flujo para restaurar las condiciones de equilibrio; y dado que el único componente que puede fluir es el solvente, sobre éste ocurren dos tipos de urgencias para lograr que las desigualdades (V.6) y (V.7) restablezcan los valores de equilibrio que satisfacen a (V.3) y (V.4). Una de estas urgencias relacionada con la desigualdad (V.6) está representada por la presencia del flujo de difusión. Las dos respuestas del sistema para lograr el equilibrio son de naturaleza distinta, ya que el flujo osmótico involucra un flujo convectivo. No obstante esta conclusión, no deriva de las ecuaciones aquí tratadas sino de una teoría de transporte.

Resulta interesante destacar que la medida obtenida de la presión osmótica sólo tiene sentido si el sistema está en equilibrio, por lo que suele definirse en los libros de texto como la presión que debe ser aplicada a una solución para lograr que el potencial químico del solvente en la solución sea igual al potencial del solvente puro a la misma temperatura. No obstante, el concepto de presión osmótica así definido no tiene una relación con el flujo osmótico. Es más, en el caso de que el flujo osmótico eleve una columna líquida para producir un exceso de presión y así restituir el equilibrio, la presión osmótica parece ser una consecuencia del flujo osmótico, contrariamente a lo que se pudiera pensar respecto a que la presión es la causa de un flujo asociado.

De acuerdo al bosquejo histórico que hemos planteado, la ecuación matemática rigurosa de la presión osmótica no fue la propuesta por la termodinámica clásica sino la aproximación para soluciones diluidas, que asemeja la forma de la ecuación del estado de un gas ideal

$$\pi = N_b RT \quad (V.8)$$

Donde N_b es el número de moles de soluto en la solución por unidad de volumen, R es la constante de los gases y T la temperatura absoluta.

Esta ecuación fue propuesta originalmente por Van't Hoff, interpretando los experimentos de Pfeffer. Fue entonces cuando se creyó que la presión osmótica era un parámetro del estado de una solución, independientemente de la presencia de una membrana. Ya hemos anotado antes que tal interpretación es errónea, ya que el concepto de presión osmótica aparece como una restricción necesaria para mantener al sistema en un estado de equilibrio. La ecuación de Van't Hoff es válida para soluciones diluidas y se utiliza en situaciones donde los cambios de la concentración debida al flujo osmótico son pequeños.

5.4.2. Cálculo de la presión osmótica.

Es muy importante conocer el valor de la presión osmótica de la solución de aporte ya que condiciona la presión de trabajo y, por tanto, el consumo de energía en el proceso.

Consideraciones termodinámicas permiten establecer que la relación existente entre la presión osmótica de una solución y la concentración de sustancias que la componen viene dada por la ecuación de Van't Hoff, escrita en la siguiente forma:

$$\pi = -\left(\frac{RT}{V_0}\right) \ln a_0 \quad (V.9)$$

siendo,

- π = presión osmótica de la solución,
- a_0 = actividad del solvente (agua),
- R = constante de los gases perfectos,
- T = temperatura absoluta, K,
- V_0 = volumen molar parcial del disolvente en la solución.

La Tabla 5.8 muestra los valores de RT y RT/V₀ para el agua de acuerdo con Dresner y Johnsons.

Temperatura °C	Valores de RT			Valores de RT/V	
	cal/mol	kWh/molx10 ⁻⁴	kWh/m ³	Bares	kgf/cm ² x 10 ³
0	0.00	6.309	35.02	1.260	1.285
10	562.7	6.540	36.30	1.305	1.332
20	582.6	6.771	37.58	1.350	1.377
25	592.5	6.886	38.22	1.371	1.399
30	602.4	7.002	38.87	1.392	1.420
50	642.2	7.464	41.43	1.473	1.502
75	691.9	8.041	44.63	1.566	1.597
100	741.5	8.619	47.84	1.650	1.683

Tabla 5.8: Valores de RT y RT/V₀ para el agua de acuerdo con Dresner y Johnsons.

Habida cuenta de que en un kg de agua existen 55.51 moles, la actividad de la misma en una solución viene dada por la ecuación (V.10)

$$\ln a_0 = \frac{\sum m_i}{55.51} \phi \quad (V.10)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (V.9) queda finalmente

$$\pi = 0.08308 \phi (t + 273.16) \sum m_i \quad (V.11)$$

siendo,

π = presión osmótica en bares,

ϕ = coeficiente osmótico,

t = temperatura del agua, °C,

$\sum m_i$ = suma de las molalidades de todos los constituyentes de la solución, tanto iónicos como no iónicos.

Molalidad. La molalidad de cada constituyente se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$m_i = \frac{C_i}{1000PM_i \frac{10^6 - TDS}{10^6}} \quad (V.12)$$

donde,

C_i = concentración del componente i de la solución, mg/l

PM_i = peso molecular del componente i.

TDS = contenido en sales totales de la solución, mg/l

Coficiente osmótico. El coeficiente osmótico viene dado por la ecuación:

$$\phi = 1 - \frac{S}{3.375I} \left(A - 2LnA - \frac{1}{A} \right) + BI + CI^2 \quad (V.13)$$

donde,

$$S = 1.17202 \left(\frac{\sum m_i Z_i^2}{\sum m_i} \right) \left[\frac{23375.556}{D(t + 273.16)} \right]^{3/2} \rho^{1/2} \quad (V.14)$$

$$I = \text{Fuerza iónica} = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2 \quad (V.15)$$

$$\rho = \text{densidad del agua} = 1.00157 - 1.56096 \cdot 10^{-4} t - 2.69491 \cdot 10^{-6} t^2 \quad (V.16)$$

$$A = 1 + 1.5I^{1/2} \quad (V.17)$$

$$B = 6.72817 - \frac{348.662}{t + 273.16} - 0.971207 Ln(t + 273.16) \quad (V.18)$$

$$C = \frac{40.4016}{t + 273.16} - 0.721404 + 0.103915 \ln(t + 273.16) \quad (\text{V.19})$$

$$D = 233.73 + \frac{5321}{t + 273.16} - 0.9297(t + 273.16) + 0.001417(t + 273.16)^2 - 8.292 \times 10^{-7}(t + 273.16)^3 \quad (\text{V.20})$$

$$I' = \frac{1}{2} \sum m_i \quad (\text{V.21})$$

Para estimaciones rápidas pueden adoptarse los siguientes valores:

Aguas salobres $\phi = 0.93$

Aguas de mar $\phi = 0.902$

En el proceso de la ósmosis inversa, la concentración de la solución a tratar suele expresarse en mg/l NaCl. Equivale a la concentración que debería tener una solución de NaCl que presentase la misma presión osmótica que la solución a tratar.

Como la presión osmótica de una solución de NaCl en agua viene dada por la expresión

$$\pi = \frac{0.002654C(t + 273.16)}{1000 - \frac{C}{1000}} \quad (\text{V.22})$$

siendo,

π = presión osmótica, bares

C = concentración, mg/l

t = temperatura, °C

la concentración de una solución expresada en ppm de NaCl sería

$$C = \frac{1000 \pi}{\left[0.2654(t + 273.16) + \frac{\pi}{1000} \right]} \quad (\text{V.23})$$

5.4.3. Sistemas de membrana

El diseño de sistemas de membrana requiere una comprensión de la terminología de membranas, configuración de elementos, pretratamiento, tratamiento de membranas y postratamiento.

5.4.3.1 Polarización de la Concentración

El método más común de describir una membrana es primero por el nombre que es ósmosis inversa o nanofiltración, y después por su rendimiento. Aunque cualitativa, la descripción tiene una implicación inmediata de desalinización de agua marina o salobre o ablandamiento de agua. Desafortunadamente no hay proposición estándar contra la que se mida el rendimiento de las membranas (por ejemplo, composición y concentración de la solución de alimentación, presión, temperatura, número de Reynolds), o que sea facilitada por los diferentes suministradores que trabajan en este campo.

La resistencia al transporte es un problema típico de separación de membranas y en este sentido la eficiencia de los procesos de membrana accionados por presión depende no sólo de las propiedades de la membrana, sino también en gran medida de cómo se opera en el proceso. La hidrodinámica del sistema tiene una influencia directa en la reducción de las resistencias de transporte en la interfase de la membrana, y los diseños del módulo que permiten una buena distribución del flujo de fluido y mezclado en la interfases de membrana ayudan a aliviar el efecto destructivo que la polarización de la concentración y una máxima tasa de recuperación para minimizar los efectos de la polarización de la concentración.

Un método usado a menudo para comparar el rendimiento de membranas de AC gráficamente es a través de relaciones log-log de su coeficiente de permeabilidad del agua pura A versus su coeficiente de permeabilidad salina (B), allí donde los efectos de la polarización de la concentración sean tenidos en cuenta (Denisov, 1994). Las ecuaciones básicas de transporte por difusión usadas para el flujo de agua y sal están dadas a continuación (Merten et al., 1964; Lonsdale et al., 1965; Rosenfeld y Loeb, 1967):

$$\text{Flujo de agua:} \quad J = A[\Delta P - \Delta \pi] \quad (\text{V.24})$$

$$\text{Flujo de sal:} \quad J = B\Delta C \quad (\text{V.25})$$

En la operación de membranas de OI y NF, los solutos y otras especies de la corriente de alimentación son transportados hacia la superficie de la membrana por el flujo convectivo, a una velocidad equivalente a la del solvente permeado. A causa de la naturaleza semipermeable de la membrana, el soluto presente en la corriente de alimentación será retenido en la interfase de la membrana. La velocidad de flujo cruzado que prevalece en la región límite es esencialmente laminar y el retrotransporte del soluto retenido en la corriente puede, por otra parte, ser sólo por difusión. En orden a la retrodifusión del soluto $-D(dc/dx)$ para equilibrar el flujo convectivo de soluto hacia la superficie de membrana (JC), la concentración de soluto en la membrana (C_s) deberá ser mucho más elevada que la que hay

en la corriente (C_c). (La figura 5.22 presenta este caso, suponiendo que no hay ninguna capa de ensuciamiento presente sobre la membrana/interfaz de alimentación)

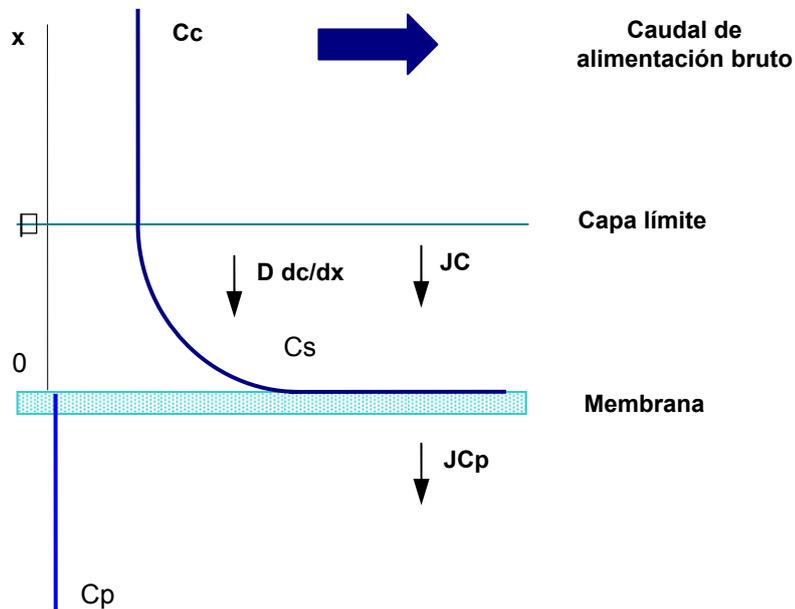


Figura 5.22: Condiciones de capa límite en la membrana/interfase de alimentación.

Como las membranas tienen imperfecciones, algunos solutos se difundirán a través de la barrera semipermeable. En estado libre, el transporte convectivo de soluto hacia la membrana será equivalente al retrotransporte difusivo de soluto más lo que pase con el permeado (JC_p). De las condiciones límite dadas en la Figura 5.22, puede construirse el siguiente balance de masa:

$$JC - \left(-D \frac{dC}{dx} \right) = JC_p$$

$$x = 0 \Rightarrow C = C_s$$

$$x = \delta \Rightarrow C = C_c$$
(V.26)

La integración de la ecuación (V.26) da como resultado:

$$\ln \frac{C_s - C_p}{C_c - C_p} = \frac{J\delta}{D}$$
(V.27)

que también puede describirse como:

$$\frac{C_s - C_p}{C_c - C_p} = e^{\left[\frac{J\delta}{D} \right]}$$
(V.28)

El coeficiente de transferencia de masa B tiene relación con la razón entre el coeficiente de difusión D y el espesor δ de la capa límite:

$$B = \frac{D}{\delta} \quad (\text{V.29})$$

El rechazo de soluto de la membrana puede expresarse como:

$$R = \left(\frac{C_s - C_p}{C_s} \right) = \left(1 - \frac{C_p}{C_s} \right) \quad (\text{V.30})$$

que permite una expresión para la relación concentración-polarización

$$\frac{C_s}{C_c} = \frac{e^{\frac{J}{B}}}{R + (1 - R)e^{\frac{J}{B}}} \quad (\text{V.31})$$

Las características de rendimiento de retención y caudal de producto de la membrana afectan a la relación de concentración-polarización; la concentración mayor de sal en la interfase membrana-solución incrementa el flujo de sal, así como la presión osmótica y por ello reduce la fuerza de la presión neta directora y el caudal de permeado.

La relación concentración-polarización para membranas tubulares en la región turbulenta ha sido dada por Brian (1965), Rosenfeld y Loeb (1967), Goel y McCutchan, (1977) como:

$$\frac{C_s}{C_c} = \frac{e^{K'}}{R + (1 - R)e^{K'}} \quad \text{donde } K' = \frac{j}{B} \quad (\text{V.32})$$

$$K' = \frac{JS_c^{0.67}}{\nu}$$

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_s} \quad (\text{V.33})$$

$$j_D = 0.023 \text{ Re}^{-0.17} = \frac{k^0 Sc^{0.67}}{\nu}$$

En términos de rechazo de soluto el valor R y la relación de desalinización D_r , que describe el paso de la membrana con el rechazo de soluto de la membrana en forma adimensional:

$$R = \left(\frac{C_p}{C_c} \right) \left(\frac{C_c}{C_s} \right) \quad (\text{V.34})$$

y

$$D_r = \frac{C_b}{C_p} \quad (\text{V.35})$$

La relación concentración-polarización puede expresarse como sigue:

$$\frac{C_c}{C_p} = e^k \left[1 - \frac{1}{D_r} \right] + \frac{1}{D_r} \quad (\text{V.36})$$

Incorporando la concentración-polarización en las ecuaciones de transporte para agua y caudal de sal y simplificando, resultan las siguientes relaciones, de las cuales pueden calcularse los coeficientes de flujo de agua y sal de la membrana:

$$J = A \left[\Delta P - \Delta \pi \left(\frac{C_s}{C_c} \right) + \frac{\Delta \pi}{D_r} \right] \quad (V.37)$$

$$J_i = BC_b \left[\frac{C_s}{C_b} - \frac{1}{D_r} \right] \quad (V.38)$$

Estas ecuaciones permiten juzgar el rendimiento de membranas sobre la relación log-log de sus coeficientes de permeabilidad de sal y agua sin considerar recuperación.

Donde,

- A = coeficiente de transferencia de masa para agua, cm/s-atm
- B = coeficiente de permeabilidad de membrana para sal, cm/s
- Cc = concentración de sal en la salmuera de alimentación, g/cm³
- Cs = concentración de sal en la superficie, g/cm³
- Cs /Cc = relación concentración-polarización
- Cp = concentración de sal en producto, g/cm³
- D = coeficiente de difusión
- Dr = relación de desalinización
- J = caudal de solvente, cm³/cm²·s
- Ji = caudal de soluto (i), cm³/cm²·s
- k = coeficiente de transferencia de masa, cm/s
- Sc = número de Schmidt para difusión salina
- Re = número de Reynolds adimensional
- v = velocidad de alimentación, cm/s
- R = retención intrínseca de sal
- jD = factor de transferencia de masa Chilton-Colburn
- P = presión osmótica, bar
- v = viscosidad cinemática
- μ = viscosidad dinámica
- dh = radio hidráulico

5.4.3.2. Principios de rechazo

El rechazo de un material dado por una membrana se define generalmente como uno, menos el ratio de la concentración de permeado a la concentración de cualquier otra parte del lado de concentrado de la membrana. En su utilización más corriente, el rechazo a través de una membrana se refiere al ratio de concentraciones en los caudales de permeado y alimentación, rechazo global que se calcula como:

$$R = 1 - \left(\frac{c_p}{c_f} \right) \quad (V.39)$$

donde c_p y c_f son las concentraciones de permeado y alimentación.

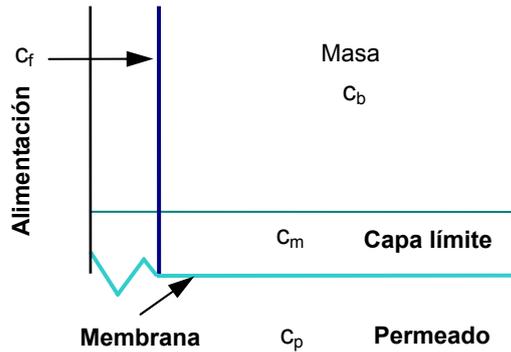


Figura 5.23: Concentraciones en varios lugares en un sistema de membrana.

Las expresiones del rechazo global pueden dar diferentes valores en función del tiempo. Las concentraciones en la alimentación son a menudo variables. Las concentraciones en el permeado pueden cambiar a la vez que las concentraciones de alimentación, transporte de masa, condición de la membrana u otros factores variables con el tiempo. Con la excepción de la criba física, donde los contaminantes son completamente retenidos por la membrana, la concentración de un contaminante en el permeado tiende a incrementarse al aumentar la recuperación del sistema; por ejemplo, $c_p = f(Y)$. La concentración total de un material aumenta a medida que el flujo atraviesa la membrana, debido a la permeabilidad del agua a través de ésta. Asimismo, los materiales rechazados tienden a acumularse con concentraciones elevadas cerca de la membrana, en comparación con el flujo bruto, debido a la polarización de la concentración. De este modo el rechazo efectivo de materiales por una membrana puede ser muy diferente del calculado basándose en la alimentación media y las concentraciones de permeado. Ocasionalmente, nos interesa el rechazo local R_{local} de una membrana, en una localización específica de la membrana, y se define como:

$$R_{local} = 1 - \left(\frac{c_p}{c_{pared}} \right) \quad (V.40)$$

donde c_{pared} es la concentración en la superficie de la membrana.

El rechazo local varía en función de la masa de contaminante transferida a la membrana que termina en una concentración elevada con respecto a la concentración bruta ($c_{pared} \geq c_{bruta} \geq c_f$). La concentración próxima a la superficie de la membrana puede predecirse, como función del flujo de permeado y el coeficiente de transferencia de materia, calculando un factor de polarización FP tal que $c_{pared} = (FP) c_{bruta}$.

El rechazo local varía a lo largo de la membrana, ya que el coeficiente de transferencia de materia y el flujo de permeado pueden también variar con la localización. Cuando el rechazo se expresa como función de la concentración bruta en vez de la concentración en la superficie de la membrana, se refiere al rechazo aparente $R_{aparente}$ que viene dado como:

$$R_{aparente} = 1 - \left(\frac{c_p}{c_{bruta}} \right) = 1 - (1 - R_{local})(FP) \quad (V.41)$$

Si se realiza un balance de masa sobre el módulo de membrana, se llega a la siguiente expresión que relaciona el rechazo global respecto del aparente:

$$R = 1 - \left(\frac{c_p}{c_f} \right) = 1 - \frac{1 - (1 - Y)^{1 - R_{aparente}}}{Y} \quad (V.42)$$

5.4.3.3. Efectos sobre el rendimiento

a) Efectos de la Presión y Recuperación

Según el modelo mostrado en la ecuación (V.24), el caudal de producto a través de una membrana es proporcional a la presión diferencial neta a través de la misma. El caudal de sal no está afectado por la presión aplicada, sino que es proporcional a la diferencia de concentración. En un sentido indirecto, sin embargo, la presión aplicada tiene efecto sobre el rendimiento de retención. A bajas presiones de trabajo, el caudal de agua resultante es menor mientras que el caudal de sal permanece a nivel constante.

El porcentaje Y de recuperación, o conversión, que es

$$Y = \left[\frac{Q_p}{Q_f} \right] 100 = \left[\frac{Q_p}{Q_p + Q_c} \right] 100 \quad (V.43)$$

también tiene un efecto sobre el rendimiento de la membrana, ya que afecta a ambos caudales: de sal y producto. A medida que la conversión aumenta, la concentración de sal en la corriente de alimentación se incrementa, lo que produce un incremento en la fuerza actuante sobre el

flujo o paso de sal. Además, los mayores niveles de concentración salina en la corriente de alimentación aumentan la presión osmótica, lo que reduce la fuerza actuante o presión neta y, por otro lado, el caudal de producto.

El factor de concentración, por otra parte, puede relacionarse con la conversión mediante:

$$CF = \left[\frac{1}{1-Y} \right] \quad (V.44)$$

donde Y está expresado como una fracción decimal. Esta expresión significa simplemente que la concentración de un soluto en la corriente de alimentación será doble (si se asume un 100 por 100 de retención), si la planta de membrana trabaja a una recuperación del 50 por 100 (es decir, Y = 0.5).

Las plantas de OI de agua de mar son operadas normalmente a ratios de recuperación del 30 al 50 por 100, pero en instalaciones de agua salobre, las relaciones de recuperación pueden llegar hasta el 85 por 100 o incluso más. El control efectivo de los depósitos e incrustaciones llega a ser muy importante con estas elevadas tasas de conversión.

A estos elevados factores de concentración, el efecto negativo de concentración-polarización sobre el rendimiento de la membrana puede ser muy serio, en el sentido de que no sólo puede disminuir la calidad del permeado producido, sino que también la cantidad de caudal producido. La deposición del soluto sobre la superficie de las membranas puede cambiar las características de la separación y la elevada concentración del soluto en la interfase de la membrana incrementa el riesgo de cambio en la composición del material con la que está compuesta, debido al ataque químico (Matthiasson y Sivik, 1980).

b) Efecto de la Temperatura

El caudal de permeado predice su incremento con la disminución de la viscosidad del agua en permeación. Por esta razón, las tasas más favorables de permeación pueden alcanzarse a temperaturas más altas. Es útil, a menudo, corregir o referir el caudal de permeado a la temperatura de referencia (de 20 °C, por ejemplo) a efectos de comparación. Un método de corrección de temperatura se realiza multiplicando la tasa de permeado observada a una temperatura dada, por la relación de viscosidades del permeado. El efecto de la temperatura en el caudal de permeado se describe a menudo utilizando una expresión en la forma de ecuación de Arrhenius:

$$J_T = J_{20} e^{\frac{s}{T}} \quad (V.45)$$

donde J_T es el caudal de permeado a una temperatura arbitraria T, J_{20} es el caudal de permeado referido a la temperatura de referencia de 20 °C y s es una constante empírica que debe evaluarse para cada membrana^[1]. Así, el factor de corrección de temperatura (TCF), por el cual se ha de multiplicar el caudal de permeado a una temperatura (en este caso 20 °C), es la relación o ratio de J_T a J_{20} . No hay una razón especial para que sea utilizada 20 °C como

temperatura de referencia. Sin embargo, el uso de una temperatura de referencia distinta requiere la evaluación de un valor correspondiente de la constante empírica s . Han sido desarrolladas expresiones de forma similar para corregir el caudal de permeado de las membranas de OI sobre un rango de temperaturas. En todos los casos, estas correcciones para el caudal de permeado se aplicaron en el rango de tolerancia de temperaturas para las membranas. Utilizando una temperatura de referencia de 25 °C, Pohland (1988) indica que la expresión siguiente para el factor de corrección de temperatura es correcta, con una tolerancia aproximadamente 3 por 100:

$$\frac{J_T}{J_{25}} = 1.03^{(T-25)} \quad (\text{V.46})$$

Marsh y Erikson (1988) dan las siguientes fórmulas para el TCF, para las aplicaciones de las membranas de FilmTec FT30:

$$\begin{cases} TCF = e^{\left[3020 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right]} & T \leq 25^\circ C \\ TCF = e^{\left[2640 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right]} & T \geq 25^\circ C \end{cases} \quad (\text{V.47})$$

y, como se puede extraer del catálogo del fabricante, para las membranas Fluid Systems TFC:

$$TCF = e^{\left[3100 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{T+273}\right)\right]} \quad (\text{V.48})$$

c) Efectos Hidrodinámicos

Los coeficientes de transferencia de masa están referidos al número de Sherwood, a través de relaciones semiempíricas, normalmente de la forma:

$$Sh = a Re^b Sc^c = \frac{k_i d_h}{D} = a \left(\frac{v d_h}{\nu}\right)^b \left(\frac{\nu}{D}\right) \quad (\text{V.49})$$

donde a , b y c son constantes. Existe en la literatura técnica un número de estas relaciones para ambos regímenes laminar y turbulento, lo mismo que para el flujo en dispositivos tubulares y en canales entre placas o platos (Rautenbach y Albrecht, 1989; Porter, 1990).

De la ecuación (V.47) se deduce que, a más altas tasas de transferencia de masa (k_i), se reducirá el efecto de concentración-polarización. La relación concentración-polarización puede reducirse también rebajando el caudal de membrana e incrementando la temperatura, para aumentar las tasas de difusión. Sin embargo, de la ecuación (19), las tasas de transferencia de masa más elevadas se consiguen mejor cambiando la hidrodinámica del sistema de membrana. Esto se logra por técnicas de trabajo, (optimización de presión y velocidad lineal) o práctica de diseño (por ejemplo, diseño del sistema y desarrollo del módulo). López-Leiva (1980) estableció que el buen diseño de un módulo de OI/NF requiere, entre otras cosas, conseguir una concentración-polarización tan baja como sea posible. Para reducir la magnitud

de concentración-polarización se requieren condiciones hidrodinámicas de alto caudal turbulento o alta tensión de arrastre en caudal laminar.

La primera condición se alcanza en los sistemas tubulares de membrana como el PCI, Alcor, Wafilin y Membrateck, mientras que la alta tensión de arrastre se alcanza con canales muy reducidos, tales como los de las fibras huecas y dispositivos de placa y bastidor como los DDS, Rhone-Poulenc y GKSS.

La tasa de transferencia de masa puede aumentarse con la incorporación de promotores de turbulencia en el interior del canal de flujo de alimentación. El más conocido promotor de turbulencias es probablemente el material espaciador del lado salmuera, utilizado en los elementos arrollados en espiral para mantener abierto canal de flujo. Sin embargo, debido al diseño del separador, se alcanza una mezcla excelente y una buena transferencia de masa a bajas tasas de caudal lineal y a bajas presiones diferenciales. Schock y Miquel (1987) desarrollaron correlaciones para las condiciones típicas de OI en un canal con separador y demostraron que un canal plano de celda de pruebas puede ser utilizado para estimular las condiciones en un elemento arrollado en espiral. Utilizando una celda de pruebas en canal plano. Da Costa et al. (1991) examinaron el efecto del diseño de un separador sobre el caudal, transferencia de masa y pérdida de presión para condiciones típicas de UF, e identificaron factores de diseño del espaciador que producen el rendimiento óptimo. Obtuvieron nuevas correlaciones para el factor de transferencia de masa y factor de fricción y nuevos atisbos en el papel de los espaciadores o separadores.

Las técnicas mecánicas y de fuerza se ha usado también en los dispositivos de membranas tubulares para incrementar el mezclado. Un caso típico es instalar mezcladores estáticos en el paso de flujo (Pitera y Middleman, 1973) o, en aproximación, incluso emplear perfiles secundarios de flujo inducido como los vórtices Taylor, que se establecen bajo condiciones de flujo cerrado, para aumentar las tasas de transferencia de masa (Belfort, 1989). Últimamente el flujo pulsátil y el pulverizado de aire recibieron mucha atención como técnicas mediante las cuales se aumenta el rendimiento de la membrana (Gupta et al., 1993).

5.5 Diseño de sistemas.

El principio de utilización del módulo es simple. Una bomba asegura la presurización de la alimentación y circulación a lo largo de la membrana. Se coloca una válvula sobre la línea del retenido (o concentrado) para mantener la presión dentro del módulo. El permeado sale fuera a una presión P_p generalmente cercana a la presión atmosférica (P_a).

La elección de la bomba, lo mismo que la adaptación de la válvula, permite el ajuste independiente de la presión media a través de la membrana o P_{tm} y la conversión Y . La presión transmembrana se define como:

$$P_{tm} = \frac{P_{entrada} - P_{salida}}{P_p} \quad (V.50)$$

donde,

- P_{tm} = presión transmembrana
- $P_{entrada}$ = presión a la entrada del módulo
- P_{salida} = presión a la salida
- P_p = presión de permeado

La conversión es la relación o ratio entre el caudal de permeado y el caudal de alimentación a la entrada del módulo.

Para un módulo dado, es ventajoso trabajar a un ratio elevado de conversión; esto limita verdaderamente el costo de la bomba y de las tuberías y también la energía consumida por la circulación del retenido. No obstante, si la relación o ratio de conversión es muy alta, el factor de concentración en el módulo puede alcanzar valores tales que:

- La solubilidad producto de los varios componentes sea excedida.
- La viscosidad llegue a ser excesiva.

En OI y NF tendrá lugar el depósito, mientras que en UF y en MF puede formarse un gel de proteínas, junto con una progresiva obstrucción de los canales de circulación.

En la forma clásica de operación de los módulos de placa y bastidor, o módulos tubulares, las membranas a presión son operadas bajo condiciones de alta velocidad de flujo cruzado con el fin de limitar los fenómenos de polarización y/o espesor de la torta de filtraje. Esto lleva a la elección de una baja conversión en un solo elemento y la necesidad de combinar varios elementos en serie para obtener conversiones razonables, con bajo consumo relativo de energía.

La conversión puede ser mayor generalmente en módulos de arrollamiento espiral y de fibra hueca. En este último caso, cuando se usan barridos secuenciales, el trabajo con 100% de conversión ha demostrado ser tan efectivo como el caudal cruzado. La Tabla 5.9 resume las cifras de conversión mantenidas normalmente para cada tipo de módulo.

	Placas (por placas)	Fibra hueca	Arrollamiento espiral (por elemento)	Tubular (por tubo)
OI/NF	5-15	30-60	10-25	0.2-2
UF/MF	1-5	5-15*, 100**	2-10	0.5-5

* Filtración tangencial.

** Final ciego (ciclo de filtración)

Tabla 5.9: Ratios de conversión típica (Y en porcentaje) para cada elemento modular en procesos de membrana impulsados a presión.

Existen unos límites operativos establecidos por los fabricantes para cada tipo de membrana. De forma que si se superan estos límites se producirá un mal funcionamiento futuro de las membranas que acortará, en algunos casos muy rápidamente, su vida media operativa. Los límites de operación de las membranas OI varían en función del tipo de material constitutivo de las mismas, así como de su modelo y tamaño; no obstante en la Tabla 5.10 se muestran algunos valores orientativos de los límites operativos de las membranas OI, más frecuentemente utilizados en la actualidad.

Membrana de Poliamida Aromática arrollada en espiral		Máximo caudal de alimentación por membrana (l/min)	Mínimo caudal de concentrado por membrana (l/min)	Maxima presión de operación (bar)	
Φ (")	Longitud (")			Agua salobre	Agua de mar
2.5	40	20-22	5-7	40	70
4.0	40	60-70	11-15	40	70
8.0	40	250-300	4-75	40	70

Tabla 5.10: Valores orientativos de los límites operativos de membranas de OI.

Las instalaciones de membranas a plena escala comprenden módulos en serie y paralelo y operan de distintas maneras, estos son los tipos de sistemas:

- **Sistema de producción de bucle abierto:** Incluye un depósito de alimentación una bomba de recirculación y un conjunto de módulos Figura 5.24. Una válvula colocada en la línea de retención, ajusta la presión a través de las membranas. A medida que el permeado se retira, la concentración en el depósito aumenta, pero el caudal de permeado Q_p disminuye (o la presión aumenta si el sistema trabaja a Q_p constante). Una de las desventajas de este sistema es el alto consumo de energía, ya que sólo una pequeña parte del líquido presurizado pasa a través de la membrana. Sin embargo, se utiliza normalmente para aplicaciones en las cuales los volúmenes a tratar son bajos, ya que el coste de la inversión es menor que para

los otros tipos de operación; un ejemplo típico es el tratamiento de aceites solubles (unos pocos cientos de litros por día) por UF.

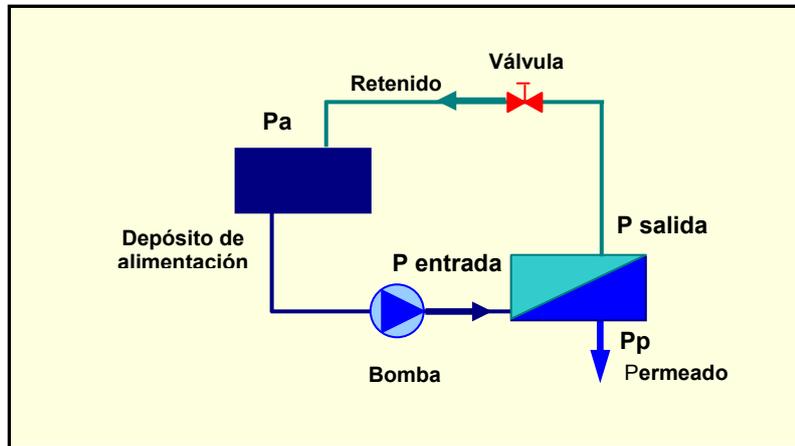


Figura 5.24: Disposición: Sistema de depósito con bucle abierto.

- **Sistema de producción de bucle cerrado:** El sistema anterior se modifica colocando una bomba de alimentación forzada entre el depósito y la bomba de recirculación. La ganancia de energía, comparada con el sistema de bucle abierto, es tanto mayor cuanto más alta es la presión de salida P_{salida} .

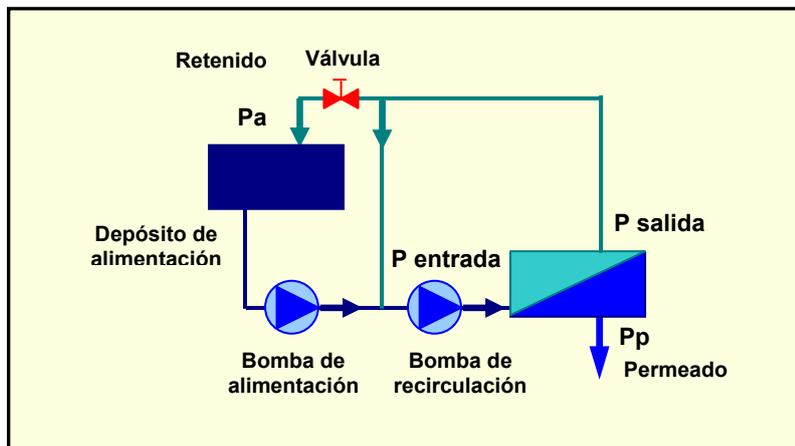


Figura 5.25: Disposición: Sistema de depósito con bucle cerrado.

- **Sistema continuo monoetapa:** Cuando el líquido a tratar se produce en forma continua, el retenido se evacua constantemente y el depósito de alimentación ya no es necesario. La válvula colocada sobre la línea del retenido controla la conversión, que en el caso de la figura es del 90%. La desventaja en este caso es que el sistema opera con una alta concentración en el bucle y, por tanto, con un bajo caudal de permeado.

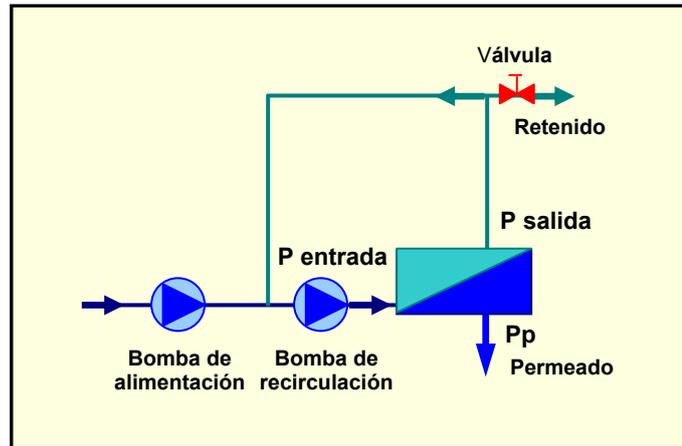


Figura 5.26: Disposición: Sistema de depósito continuo monoetapa.

- Disposición multietapa con recirculación:** Este sistema se utiliza principalmente en instalaciones a gran escala de UF o MF. Cada etapa está alimentada por el retenido de la precedente. El número de módulos instalados en paralelo en cada etapa determina el grado de conversión; el caudal medio por módulo es mayor que el de una instalación trabajando con igual conversión pero en una sola etapa. En este sistema se utilizan tres etapas .

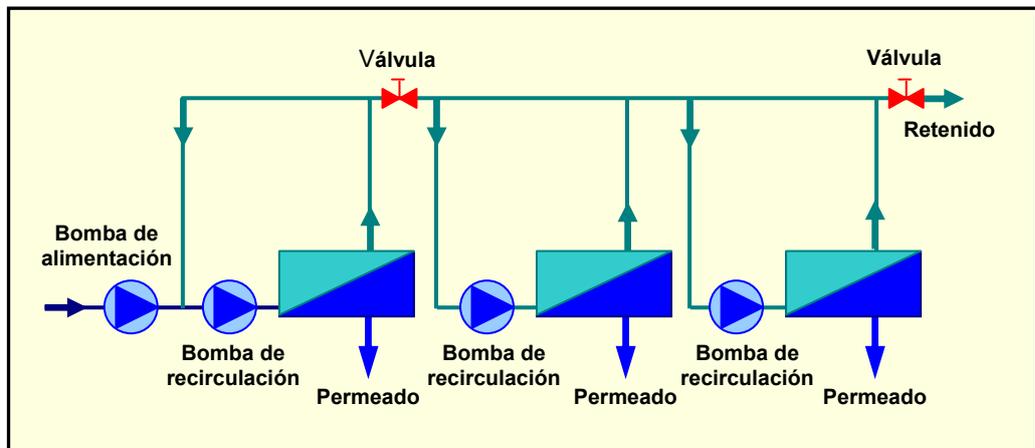


Figura 5.27: Disposición: Sistema de depósito continuo multietapa.

- Disposición multietapa sin recirculación:** En OI o NF, la presión media de trabajo es mucho mayor que la caída de presión a través de los módulos. No se requieren, pues, bombas de recirculación.

5.5.1. Criterios de diseño

Un sistema convencional de tratamiento por OI incluye pretratamiento, filtrado de membrana y postratamiento, y se muestra en la figura siguiente.

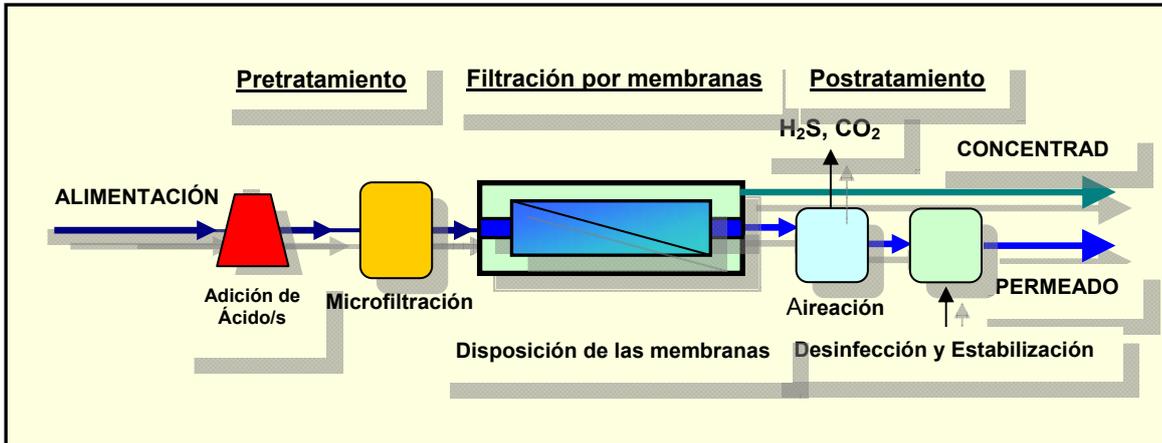


Figura 5.28: Proceso convencional de membranas OI.

Cualquier corriente de agua bruta utilizada como corriente de alimentación para un proceso de membrana debe comprender un pretratamiento convencional o avanzado. El pretratamiento convencional incluye adición de ácido o anti-incrustante para evitar la precipitación de sales durante la filtración de las membranas. El pretratamiento avanzado tiene lugar antes del pretratamiento convencional y es necesario cuando el agua cruda o bruta tiene excesivos materiales ensuciadores. La filtración por membrana es el paso del agua pre tratada a través de una membrana activa de OI/NF con un tamaño de poro de 0.001 a 0.0001 μm . El postratamiento incluye muchas operaciones unitarias comunes al tratamiento de agua potable como aireación, desinfección y control de corrosión. En todos los procesos de membrana de agua potable como aireación, desinfección y control de la corrosión. En todos los procesos de membrana de agua potable habrá una corriente de alimentación entrante al proceso y dos corrientes de salida abandonando el proceso: una de las corrientes será concentrada y las dos restantes serán corrientes de producto. Como se ve en la figura, el proceso de separación dividido en pretratamiento avanzado, pretratamiento convencional, filtración en membranas y postratamiento y una corriente de entrada y dos corrientes de salida es útil para obtener una visión amplia del diseño de OI/NF.

Crudo, bruto	Corriente de entrada al proceso de membrana.
Proceso convencional OI	Sistema de tratamiento que consta de adición de ácido o anti-incrustante para control de incrustación (pretratameitno), filtrado por membrana OI, aireación, cloración y control de la corrosión por postratamiento.
Alimentación	Corriente de entrada al dispositivo de membrana
Concentrado, rechazo, retenido, corriente residual	Corriente de salida de la membrana que contiene mayor cantidad de TDS que la corriente de alimentación
Salmuera	Corriente conteniendo una cantidad de TDS más alta que la corriente de entrada.
Permeado o producto	Corriente de salida de membrana que lleva menor TDS que la corriente de alimentación.
Elemento de membrana	Una sola unidad de membrana conteniendo un mazo o grupo de membranas arrolladas en espiral o en forma de FFH para proveer un área superficial nominal.
Recipiente, vasija o tubo de presión	Un solo tubo que contiene varios elementos de membrana en serie.
Etapas o banco	Tubos de presión en paralelo.
Dispositivo o tren	Etapas múltiples conectadas en serie.
Disposición de alta recuperación	Disposición donde se concentran corrientes de sucesivos dispositivos y está alimentada para sucesivas disposiciones con el fin de incrementar la recuperación.
Sistema de disposiciones	Varias disposiciones que producen el caudal requerido por la planta.
Rechazo	Reducción porcentual de la concentración del soluto de la corriente de permeado relativa a la corriente de alimentación.
Soluto	Sólidos disueltos en la corriente de bruto, alimentación, permeado y concentrado.
Flujo	Tasa de caudal de masa ($ML^{-2} t^{-1}$) o volumen (Lt^{-1}) de transferencia a través de la superficie de membrana.
Incrustación	Precipitación de sólidos en el elemento debido al soluto.
Ensuciamiento	Depósito de material sólido existente en el elemento de la corriente de alimentación de la membrana.
Coefficiente de transferencia de masa (CTM)	Unidad de masa o volumen transferida a través de la membrana y producida por la fuerza actuante.

Tabla 5.11: Terminología de membranas.

5.5.2. Recuperación de energía

La incorporación de equipos de recuperación de energía es práctica habitual en las instalaciones de agua de mar, en las que al alcanzarse recuperaciones inferiores al 50%, existe un potencial de energía muy importante para recuperar en el rechazo.

Teniendo en cuenta la eficiencia de los equipos de recuperación, ahorros del 30 al 35% de la potencia son factibles. Esto supone además reducir la potencia de los motores y por tanto menores gastos de inversión.

Cuando la turbina es una bomba invertida hay que tener en cuenta que su curva de presión y eficiencia también lo es, pero su pendiente es mayor que la de la correspondiente bomba.

Esto significa que pequeñas variaciones en el caudal tienen más repercusión en la eficiencia de la turbina que en la de la bomba, por lo cual es más interesante la adecuada selección de su punto de funcionamiento y por tanto de la citada turbina.

En las instalaciones de agua salobre la rentabilidad de las turbinas es sin embargo más dudosa y debe analizarse profundamente antes de tomar la decisión.

Con las recuperaciones e producto habituales en estos casos, del 70% y superiores, sólo de un 10 a un 25% del caudal de alimentación pueden ser aprovechados en las turbinas. Teniendo en cuenta que las turbinas de menores capacidades tienen también rendimientos menores, finalmente no se consigue alcanzar en muchos casos sino recuperaciones energéticas del 5 al 7%.

No parecen pues aconsejables estos equipos en instalaciones pequeñas en los que introducen además complicaciones de manejo y funcionamiento, para los que muchas veces no se dispone de os medios humanos necesarios. En las instalaciones mayores y compuestas de varios bastidores es más frecuente la instalación de equipos de recuperación de energía, aunque no individuales. Lo que se hace generalmente es recoger el rechazo de todos los bastidores existentes y concentrarlos en uno o dos colectores comunes que los llevarían a una o dos turbinas. Por tanto sólo uno o dos de los trenes de producción estarían dotados de turbobombas y recuperarían energía.

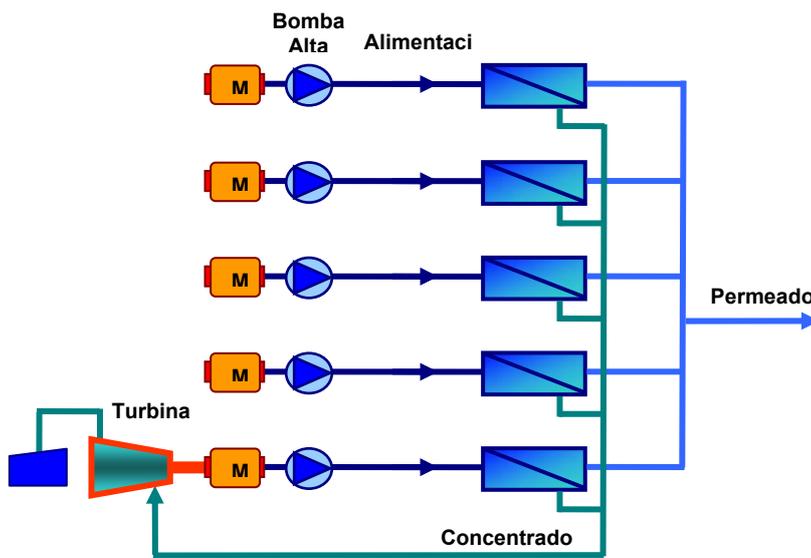


Figura 5.29: Turbina en instalaciones de alta recuperación.

En la instalación habría en consecuencia dos tipos de trenes de producción, el normal sin turbina y los que llevan turbina incorporada, que además estarán dotados de motores de menor potencia. Se introduce una mayor diversificación de equipos con sus consiguientes repuestos cuya conveniencia también debe analizarse.

En muchos casos la instalación de variadores de velocidad puede incluso ser más ventajoso que la colocación de dicha turbina.

En la elección de la turbina también existen dos opciones según se trate de una turbina tipo Pelton o una bomba multietápica invertida.

Las turbinas Pelton tienen rendimientos superiores, especialmente para caudales pequeños, pero a medida que aumenta su capacidad estos se van igualando llegando a diferencias más pequeñas.

Sin embargo dentro del conjunto bomba-turbina para instalaciones de agua de mar, la primera impulsa el caudal total, mientras la segunda sólo recibe el 55-60% del mismo. Es decir, que la diferencia de utilizar uno u otro tipo de turbina puede suponer ahorros energéticos entre el 5 y el 9%.

Con los equipos utilizados normalmente en las instalaciones de agua de mar más usuales y recuperaciones medias del 40% podríamos hacer la siguiente tabla:

Producción por bastidor (m ³ /d)	Capacidad Bomba (m ³ /h)	EFICIENCIA		
		Bomba (%)	Bomba invertida (%)	Turbina Pelton (%)
1.500	65	77	70	83-84
2.500	110	80	76-77	84-85
5.000	210	82	79	86
7.000	290	84	81	88

Tabla 5.12: Eficiencia de los grupos turbobomba de alta presión.

A continuación se desarrollan las ecuaciones para obtener la potencia que necesita el motor para impulsar la bomba de alta presión de una instalación de ósmosis inversa, así como, la potencia que puede recuperarse si se instala algún sistema de recuperación.

Conversión: Y (fracción)

Presión máxima: P_{max} (kPa)

Bomba:

Presión mínima de aspiración: P_{min} (kPa)

Sobredimensionamiento de la capacidad de impulsión: C_i (fracción)

Rendimiento: η_{bomba} (fracción)

Motor:

Rendimiento: η_{motor} (fracción)

Caudal de alimentación necesario:

$$Q_a (m^3/h) = \frac{Q_p (m^3/d)}{24 \cdot Y} \quad (V.51)$$

Caudal de la turbobomba:

$$Q_{bomba} = Q_a \cdot C_i \quad (V.52)$$

Incremento de elevación:

$$P_{bomba} = P_{max} - P_{min} \quad (V.53)$$

Potencia de la bomba: (kW)

$$Pot_{motor} = \frac{P_{bomba} \cdot Q_{bomba}}{\eta_{bomba}} \quad (V.54)$$

Potencia del motor: (kW)

$$Pot_{motor} = \frac{P_{bomba} \cdot Q_{bomba}}{\eta_{motor} \cdot \eta_{bomba}} \quad (V.55)$$

Perdida de carga: Pperdida (kPa)

Rendimiento del equipo de recuperación, turbina: η_{tur} (fracción)

Potencia recuperada: (kW)

$$Pot_{tur} = (P_{bomba} - P_{perdida}) \cdot Q_{bomba} \cdot (1 - Y) \cdot \eta_{tur} \cdot \eta_{motor} \quad (V.56)$$

5.6. Modelos matemáticos de simulación

5.6.1. Fenómenos de transporte en membranas

5.6.1.1. Introducción

Existen diversas teorías para explicar y describir el transporte de solvente (agua pura) y de soluto (sales) a través de una membrana semipermeable, teniendo cada una su campo de utilización.

Para las membranas de ósmosis inversa, el modelo utilizado habitualmente es el de *modelo de solución-difusión*. Según este modelo, cada componente de la solución a tratar se disuelve en la membrana según las leyes de distribución y equilibrio conocidas, difundiéndose a continuación a su través debido a las diferencias de concentración y de presión existentes a ambos lados de la membrana.

La difusión del agua y de las moléculas polares a través de la membrana sería el resultado de un mecanismo de formación y de destrucción de puentes de hidrógeno entre el agua o las moléculas polares por una parte y los grupos hidrófilos de la membrana por otra, por la acción de un gradiente de energía libre, también llamado potencial químico, producido por la diferencia de presión.

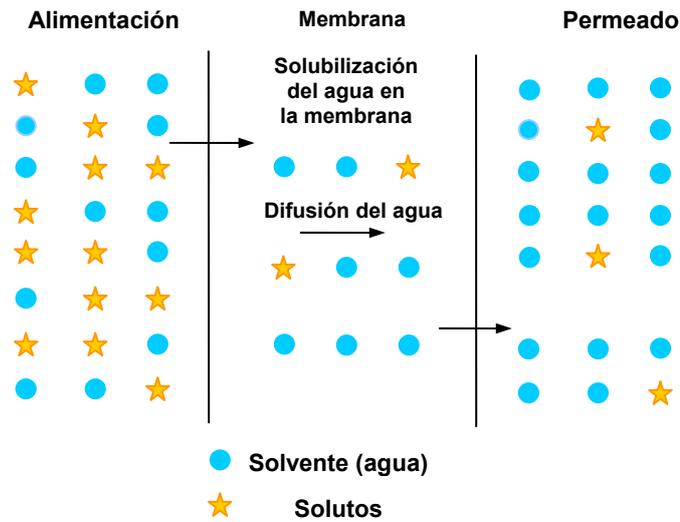


Figura 5.32: Esquema del modelo solución-difusión.

5.6.1.2. Modelo teórico de solución-difusión.

El modelo solución – difusión propuesto por Lonsdale, Merten y Riley, describe el transporte de soluto y solvante a través de membranas en términos de las afinidades relativas de estos componentes para la membrana y su transporte difusivo por el interior de la “fase” membrana. Las fuerzas directoras para el transporte son las diferencias de potencial químico a través de la membrana, debido a las diferencias en concentración y presión

5.6.1.3. Modelo de solución lineal de difusión.

Hay muchos modelos y teorías diferentes que describen la transferencia de masa en los procesos de difusión controlada en membranas; sin embargo, sólo unos pocos principios o teorías se utilizan para desarrollar la mayoría de estos modelos.

Consideremos un diagrama simple de los procesos de membrana y las ecuaciones que lo rigen:

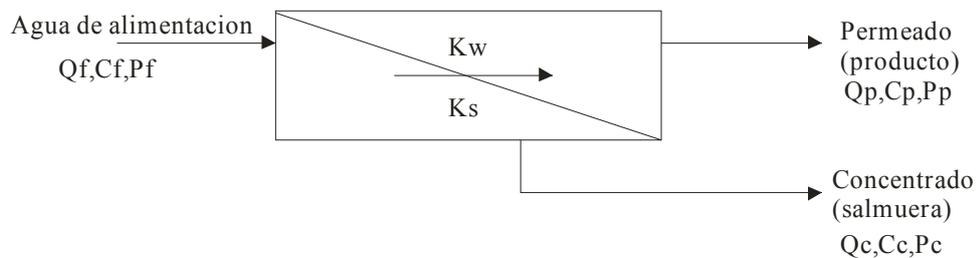


Figura 5.33. Diagrama del comportamiento de OI

$$J = K_w(\Delta P - \Delta\pi) = \frac{Q_p}{A}$$

$$J_i = K_i\Delta C = \frac{Q_p C_p}{A}$$

$$r = \frac{Q_p}{Q_f}$$

$$Q_f = Q_c + Q_p$$

$$Q_f C_f = Q_c C_c + Q_p C_p$$

Donde:

J = Caudal de agua

J_i = Caudal de soluto

K_w = Coeficiente de transferencia de masa del solvente

K_i = Coeficiente de transferencia de masa del soluto

ΔP = Gradiente de presión

$$\Delta P = \frac{P_f + P_c}{2} - P_p$$

ΔP = Presión Osmótica

$$\Delta\pi = \frac{\pi_f + \pi_c}{2} - \pi_p$$

ΔC = Gradiente de concentración

$$\Delta C = \frac{C_f + C_c}{2} - C_p$$

Q_f = Caudal de alimentación

Q_c = Caudal de concentrado

Q_p = Caudal de permeado

C_f = Concentración de soluto en alimentación

C_c = Concentración de soluto en concentrado

C_p = Concentración de soluto en permeado

r = recuperación

A = Área de la membrana

Si ΔC se define como la diferencia de concentración media de la corriente de alimentación y la de salmuera y la corriente de permeado, entonces de las ecuaciones anteriores puede resultar la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{K_i C_f}{K_w(\Delta P - \Delta\pi) \left[\frac{2-2r}{2-r} \right] + K_i}$$

Este es el modelo más simple, pero permite considerar el efecto de cinco variables independientes sobre la calidad de agua del permeado; si la presión y todas las demás variables permanecen constantes, la concentración de permeado disminuye. Si la recuperación aumenta y todas las variables permanecen iguales, la concentración de permeado aumenta.

5.6.1.4. Modelo de la teoría del film.

El modelo lineal puede modificarse por la incorporación de la teoría del film (o capa), que supone que la concentración del soluto aumenta exponencialmente desde el centro del canal de la corriente de alimentación hacia la superficie de la membrana y se retrodifunde en la masa de la corriente (Millevalle et al,1999). Matemáticamente se muestra en la ecuación:

$$J_i = -D_s \frac{dC}{dX} + C_i J$$

Donde:

D_s = Difusividad

C_i = Concentración desde la masa al interface de la membrana

Z = Longitud del camino del film

Introduciendo la constante de retrodifusión en la siguiente ecuación:

$$\left[\frac{C_s - C_p}{C_b - C_p} \right] = e^{J/k_b}$$

Donde:

C_p = Concentración del soluto en el permeado de membrana

C_b = Concentración del soluto en la masa de membrana

C_s = Concentración del soluto en la superficie de membrana

J = Caudal de agua a través de la membrana

$k_b = D_s/x$ = Coeficiente de difusión desde la superficie a la masa

Este modelo predice que la concentración en la superficie de la membrana es más elevada que en el seno de la corriente de alimentación, similar efecto se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{C_f K_i e^{J/k_b}}{k_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2r)}{(2 - r)} \right] + K_i e^{J/k_b}}$$

El coeficiente de retrodifusión k_b representa la difusión del soluto desde la superficie de la membrana hasta el seno de la corriente de alimentación, que es diferente del coeficiente de transferencia de $w k$, que representa la difusión del soluto a través de la membrana a la corriente de permeado.

5.6.1.5. Modelo de acoplamiento.

El efecto de acoplamiento sobre la transferencia de masa a través de membranas ha sido modelado utilizando una modificación estadística de la energía libre para sistemas de un único soluto (Millevalle et al,1999), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\Delta G} = -\frac{1}{E} r - \frac{\Delta}{E}$$

Donde

- ΔG = Energía libre del ión acoplado
- E = Constante dependiente de la solución
- r = Radio iónico del acoplamiento
- Δ = Constante estadística

El término de energía libre se supone diferente en el seno de la solución y en la superficie de la membrana a causa de la diferente concentración iónica en estas dos localizaciones. Consecuentemente la energía requerida para atraer a los iones a la superficie se ve en la siguiente ecuación que corresponde a la diferencia de la energía libre en el seno y en la superficie de las soluciones:

$$\Delta G = \Delta G_1 - \Delta G_B$$

Donde

ΔG = Diferencia de energía libre del ión acoplado en la interfase I y en el seno o masa B. Los coeficientes de transferencia de masa membrana-soluto específico para sistemas de un soluto se han determinado experimentalmente y relacionado con la energía libre mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(k_i) = \ln(C^*) + \sum \left[-\frac{\Delta G}{RT} \right]$$

Donde

- C^* = Constante específica de la membrana
- K_i = Coeficiente de transferencia de masa
- R = Constante del gas
- T = Temperatura absoluta

Una vez que se ha determinado la constante específica de la membrana con referencia a un soluto, es posible determinar k_s para un soluto dado en un sistema de un solo soluto. Así mismo ya conociendo k_s , puede predecirse el transporte de una masa de un soluto singular en una membrana de difusión controlada.

5.6.2. Programas de los fabricantes

5.6.2.1. Modelo de FILMTEC.

El rendimiento de un sistema de OI concreto queda definido por su presión de alimentación (o flujo de permeado, si la presión de alimentación es especificada) y su paso de sales. En sus términos más simples, el flujo de permeado Q a través de una membrana de OI es directamente proporcional a la superficie activa S multiplicada por la presión impulsora neta

$(\Delta P - \Delta \pi)$. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de permeabilidad de la membrana o valor A. La forma más familiar del caudal de permeado es:

$$Q = AS(\Delta P - \Delta \pi)$$

El paso de sales se produce por difusión, de ahí que el flujo de sales J_S sea proporcional al gradiente de concentración de sales entre ambos lados de la membrana. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de difusión de sales o valor B.

$$J_S = B(C_{fc} - C_p)$$

donde,

- C_{fc} = media de la concentración de la alimentación y el concentrado,
- C_p = concentración de permeado.

La forma más rigurosa de calcular el rendimiento de un diseño concreto es el método de elemento a elemento. Todas las condiciones de operación del primer elemento deben ser conocidas, incluyendo la presión de alimentación. Entonces el flujo, la presión, etc., del concentrado, el cual es la alimentación del segundo elemento, puede ser calculado. Después de calcular los resultados de todos los elementos, la presión de alimentación original puede ser demasiado alta o baja, entonces el proceso de error comienza con una nueva presión.

Con la ayuda del programa de ordenador FILMTEC Reverse Osmosis System Analysis (ROSA), se pueden obtener rápidamente resultados precisos, por lo que este programa puede ser usado para modificar y optimizar el diseño de un sistema de OI o de NF.

Descripción de los equipos utilizados

6.1 Introducción

La planta de O.I. diseñada para el proyecto, debe de satisfacer una serie de necesidades dentro del programa de investigación, por lo que sin dejar atrás la filosofía de una planta convencional de desalinización, debe de incluir una serie de modificaciones para llevar a cabo el proyecto.

En el proyecto se pretende averiguar cuál es el comportamiento de las membranas y de la planta trabajando en régimen variable debido a las fluctuaciones de la energía de procedencia renovable (eólico y solar), sin necesidad de adquirir los costosos equipos de producción de energía.

Para ello, se procede al cálculo de la potencia eléctrica producida por los equipos eólicos y solares hipotéticos colocados en una zona geográfica determinada, mediante los estudios eólicos y solares de la zona elegida. Una vez cruzados esos datos con las curvas de las máquinas, nos darán la potencia disponible en bornes de las máquinas.

Esos datos de potencias, que hipotéticamente tendríamos con las máquinas elegidas en el lugar seleccionado, son los que tenemos que suministrar a la planta de O.I. para su funcionamiento. El proceso se realiza a través de un variador de velocidad que va a simular la variación de potencia suministrada al motor de la planta de O.I.

Con este sistema podremos comprobar el funcionamiento de la planta en régimen variable y con paradas y arranques sucesivos, dependiendo de la disponibilidad de potencia eléctrica en el sistema (disponibilidad de viento y/o sol).

6.2 Descripción de la planta

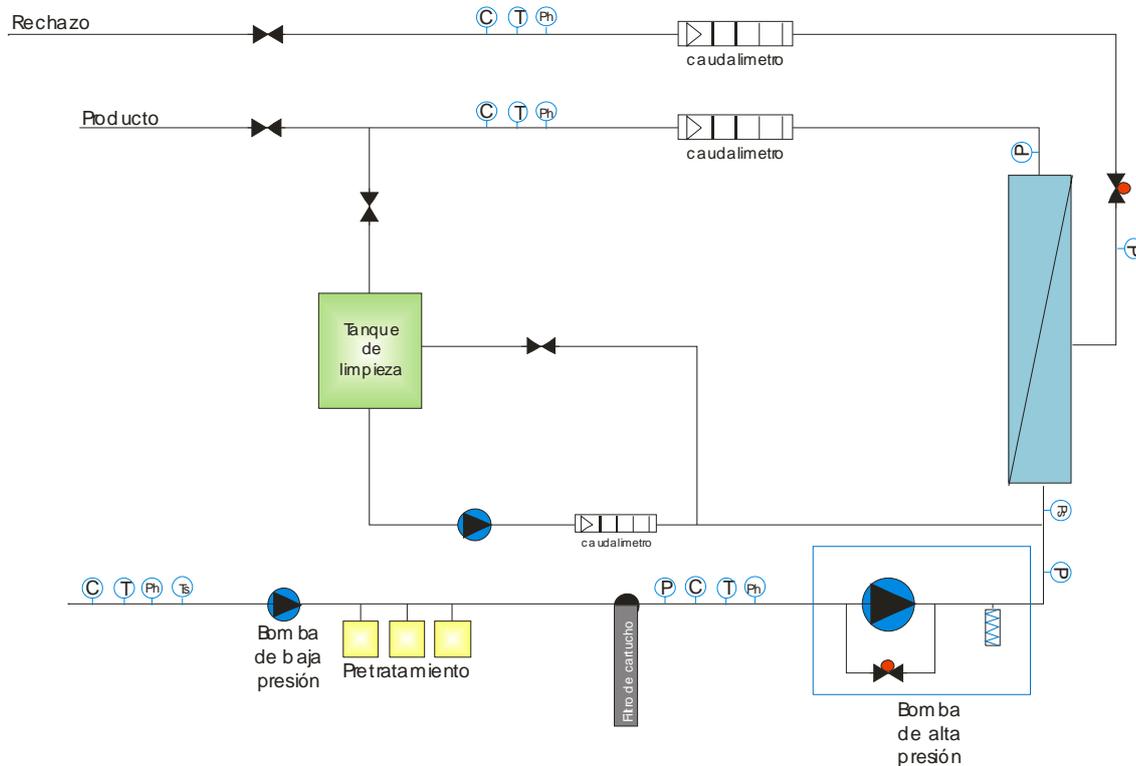


Figura 6-1 Descripción de la planta de O.I.

El esquema general de la planta es el indicado en la figura 6.1, en la que podemos observar el esquema convencional de una planta de O.I. al cual se le han hecho una serie de modificaciones, siendo las principales las siguientes:

- Tomas de pretratamiento: Con el objeto de ensayar diferentes pretratamientos, juntos o por separado, se han dejado tres tomas independientes para la adición de diferentes productos de pretratamiento.
- Tubo de presión: El tubo de presión llevara tomas de agua producto por ambas caras terminales. Se decidió este sistema, ya que para comprobar la calidad del agua producto en las diferentes membranas, se prevé tapan el colector de agua producto en el interior del tubo y así recoger el agua producto procedente de la primera membrana solamente, o de la primera y segunda, o primera segunda y tercera, y así sucesivamente, o en otros casos solamente de la sexta, quinta y sexta, cuarta quinta y sexta, etc. Con este sistema se podrá comprobar la necesidad o no en régimen variable de la utilización de *n*-membranas.
- Tanque de limpieza: Se ha colocado un tanque de limpieza automatizado, ya que debido a la automatización de la planta y a la imposibilidad de prever las paradas y arranques de larga duración, la limpieza se realizará de forma automática, pudiendo ser manual en algunos casos.

6.2.1 Descripción del proceso.

A continuación se hace una breve descripción del proceso que se lleva a cabo en la planta, desde que se produce la captación del agua hasta que obtenemos el producto deseado:

El agua de alimentación es captada en un pozo playero cercano a la planta y se bombea hasta la entrada de ésta. A continuación, se hace pasar el agua por un sistema de pretratamiento y luego por un filtro de cartucho, y ya será adecuada para ser impulsada al módulo de membranas por medio de la bomba de alta presión. Finalmente, obtenemos por un lado, la salmuera o rechazo, que se destina a un pozo filtrante playero, y por otro lado, el agua producto, que es enviada a un depósito.

El agua de alimentación es impulsada desde el pozo playero hasta la planta, y a partir de aquí comienza el proceso para obtener el agua desalada que se describe, a continuación, paso a paso:

6.2.1.1 Pretratamiento

En primer lugar el agua de alimentación pasa por la primera parte del pretratamiento que es el filtrado. Normalmente esta operación se realiza mediante filtros de arena y de cartucho.

Los filtros de arena se utilizan cuando existen problemas de exceso de este elemento en el agua de alimentación. En el caso de esta planta, como el agua es captada de un pozo playero, no son necesarios este tipo de filtros. En cualquier caso, lo óptimo es minimizar el consumo de filtros de cartucho, y la opción de disponer de un pozo supone también abaratar costes.

Los filtros de cartucho protegen a la bomba de alta presión contra cualquier partícula abrasiva proveniente del pozo que pueda ocasionarle daños. También protege a las membranas contra el taponamiento u obstrucción. Si existen filtros de arena en la planta, deberían ir primero que los de cartucho, ya que estos últimos no deben recibir el agua con un alto contenido de sólidos en suspensión, porque entonces, el ensuciamiento y colmatación de los cartuchos filtrantes sería inmediato.

A continuación del filtrado, se añade al agua un retardador de incrustación (hexametafosfato) para eliminar las incrustaciones de carbonato cálcico, sulfato cálcico, sulfato bórico y sulfato estróncico (si lo hubiera), y un aditivo de tratamiento del sílice tipo permatrix 191. Estos aditivos son suministrados en cada caso por un equipo dosificador cuyas características son similares y que están compuestos por:

- Tres depósitos de polipropileno con capacidad para unos 50 litros, con sus accesorios: Tubería de polietileno, válvula de retención y válvula de alivio de presión.

- Tres dosificadores, formados por una moto-bomba de caudal regulable, de desplazamiento positivo, monofásica a 220 V, 50 Hz y 0,09 C.V.
- Un interruptor de alta presión íntimamente ligado a la bomba de alta presión, de forma tal que impida automáticamente la adición del líquido cuando el sistema está parado, e inversamente, ponga en marcha la inyección del reactivo cuando arranque de nuevo la bomba.

6.2.1.2 Bomba de alta presión.

Una vez que ha terminado el pretratamiento, el agua llega por medio de una tubería de PVC de 63mm. de diámetro a la bomba de alta presión, la cual está dirigida por un presostato de seguridad que evita operación en vacío.

Antes de llegar a la bomba de alta presión está intercalado en la tubería de acero inoxidable AISI-316L en la aspiración de la bomba un acumulador de succión y pulsación, para evitar la cavitación. Después de la bomba y para evitar el golpe de ariete se instala también otro acumulador antivibraciones en descarga.

Como las bombas de pistón y centrífugas están peligrosamente afectadas por cambios rápidos en las condiciones de succión que traen como consecuencia la cavitación, la pérdida de eficiencia del bombeo y fallos en la bomba, el uso de un estabilizador de succión ofrece las siguientes ventajas:

- Una cámara neumática cargada de gas sirve de cojín para absorber las variaciones de presión debidas a la acción de bombeo u otras influencias.
- Facilita una velocidad baja del líquido a la entrada de la bomba.
- Facilita la separación de gases introducidos por desviación interna del flujo.
- Alarga la vida del émbolo en bombas de desplazamiento positivo.
- La cámara neumática llena de gas absorbe los cambios de presión causados por el golpe de ariete
- Los amortiguadores han sido diseñados expresamente como solución práctica y económica del control de vibraciones.
- La reducción de la vibración debe contribuir a alargar la vida de la bomba, reduce cargas sobre los instrumentos y conexiones de tuberías, y disminuye el ruido debido a la pulsación, y además:
 - Elimina los picos de presión en las mías de descarga de bombas de desplazamiento positivo.
 - Ayuda a prolongar la vida útil de bombas, válvulas, conexiones flexibles e instrumentos.
- Deflector único entre las bridas de entrada y salida, elimina hasta el 98% de todas las pulsaciones.
- Disminuye el ruido procedente del fluido.

La bomba de alta presión elegida para la planta es una bomba CAT 6761. Bomba de desplazamiento positivo de tres émbolos buzos en acero inoxidable AISI 316 y con camisas cerámicas. La tabla de características de la bomba es la siguiente:



Figura 6-2. Bomba de alta presión CAT 6761

- Caudal 13,62 m³/h
- Rango de presiones 7 - 85 BAR
- RPM 520 rpm
- Cilindro líquido en material duplex S S.
- Colector en 317 S S
- Camisas de cilindro con 317 L S S
- Pistones en cerámica sólida
- Empaquetadura square ARAMID/TEFLÓN
- Pernos acero inoxidable
- Cigüeñal forjado en acero alloy

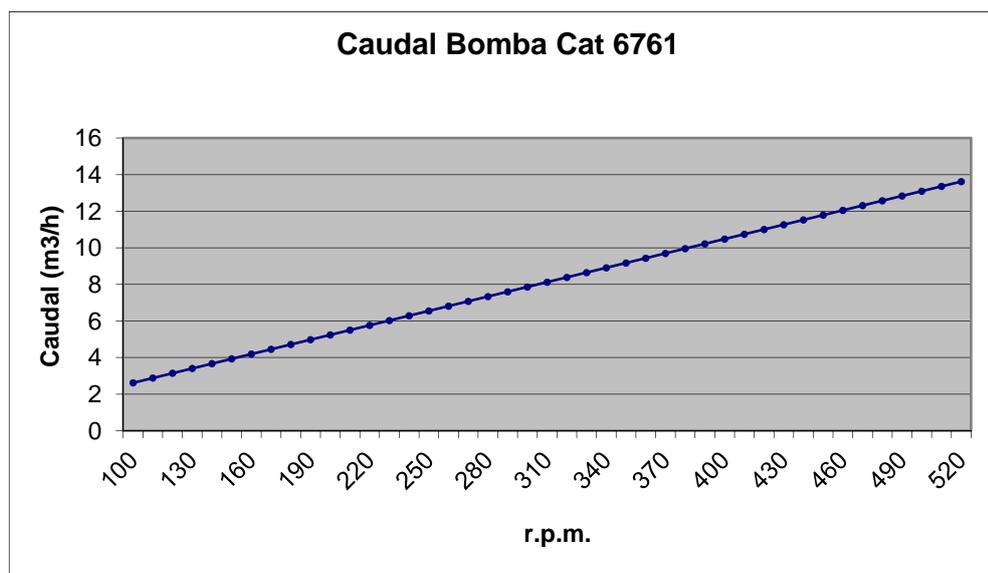


Figura 6-3 Curva funcionamiento bomba CAT 6761

En la siguiente figura podemos ver una sección de la bomba:

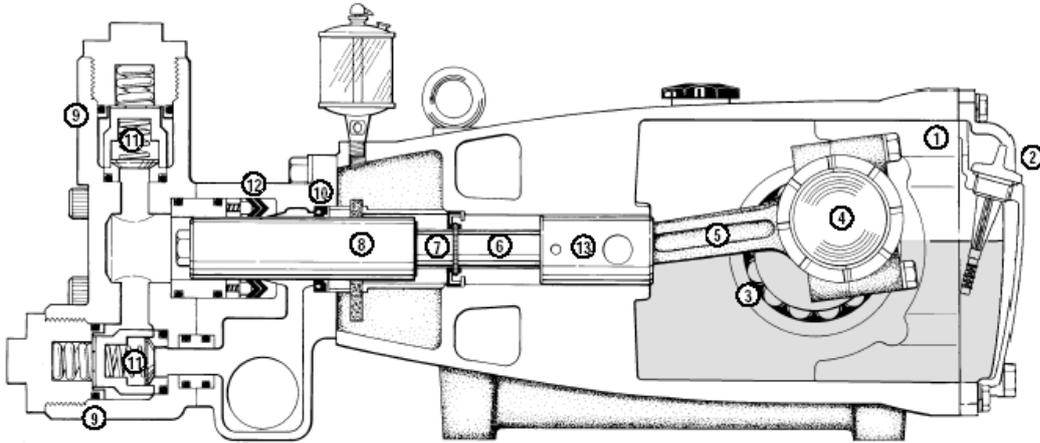


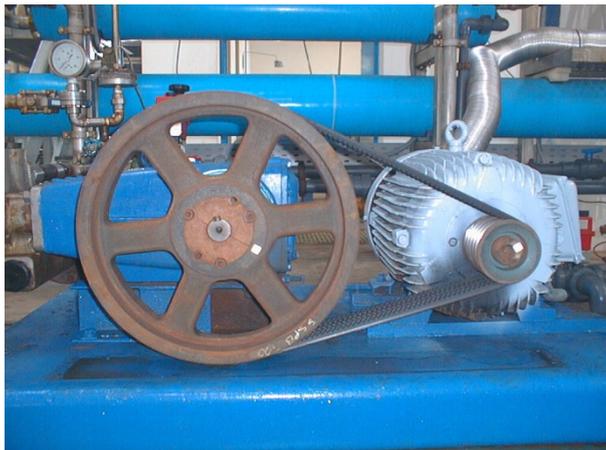
Figura 6-4 Esquema de bomba CAT 6761

Además presenta las siguientes características:

- Las válvulas son resistentes a la corrosión. El cilindro C de fundición usa pasador de presión en los asientos de válvulas. Las válvulas de succión y descarga son intercambiables. El cilindro A de alta presión tiene aletas de tipo biselado para guía de válvulas. Los cilindros B y C de medida y baja presión respectivamente, tienen válvulas de disco.
- Los prensaestopas no necesitan ajuste
- Los pistones de presión son de cerámica endurecida
- La construcción es de una sola pieza en hierro fundido gris con secciones de pared delgada y estriada para mayor rigidez, diseñado para contener un motor eléctrico con correas en V.
- El cigüeñal está construido en material resistente y puede colocarse al revés para extenderlo fuera de la cara opuesta al bombeo.
- Los dos cojinetes principales del cigüeñal son intercambiables. Son cojinetes de rodillos para servicio pesado, dimensionados para condiciones extremas de operación. Los dos cojinetes centrales son antifricción, para soporte adicional del cigüeñal, además son tipo manguito y reforzados en bronce.
- Los pistones de conexión son de hierro de alta resistencia, de estructura en H, llevan material antifricción, cojinetes con cubiertas de acero en el extremo de biela y casquillos de bronce en el extremo de la cruceta. Los cojinetes de ambos extremos son reemplazables.
- Las crucetas cilíndricas son de hierro fundido y giran completamente en el diámetro interior del cilindro.

- Las cabezas de brida de biela son en acero inoxidable y están selladas. Los sellos están provistos de doble resorte de contacto y presionados dentro de la tapa hermética, el contacto de la cara interior es para eliminar pérdida de aceite.
- Los deflectores están dispuestos en guía de muescas para reforzar la defensa de salida de líquido del prensaestopas.
- La alimentación del aceite lubricante es por gravedad. El suministro de aceite se hace a través del depósito de reserva del cigüeñal. Un canal de aceite de retorno desde el frente de las crucetas lo devuelve al cárter y permite la circulación continua de aceite, y su enfriamiento. El aceite por su parte superior, asegura la lubricación de crucetas, cojinetes de agujas de crucetas y cojinetes de bielas.
- El medidor de nivel de aceite permite la observación conveniente del nivel de aceite en el cárter estando la bomba en funcionamiento o parada.

A la bomba de alta presión se le ha incorporado un motor eléctrico trifásico como podemos ver en la figura cuyas características son las siguientes:



Características del motor eléctrico					
V	Hz	Kw	r.p.m.	A	Cos φ
400	50	30	1475	55	0.86
415	50	30	1480	53.5	0.86
440	60	36	1765	59	0.87

Figura 6-5 Acoplamiento motor - bomba

El acoplamiento entre la bomba y el motor se realiza mediante un sistema de poleas y correas trapecoidales con una relación de transmisión 4:1. En la tabla de características del motor se ha marcado en color rojo el funcionamiento del mismo para el presente proyecto, por lo que el conjunto bomba-motor queda con las siguientes características:

	r.p.m. motor	r.p.m. bomba	Presión (bar)	Caudal (m ³ /h)	Potencia (Kw)
Máx.	1500	375	85	9.8	26.43
Mín.	800	200	7	5.2	1.17

Tabla 6.1 Parámetros de funcionamiento motor - bomba

Siendo estos parámetros los máximos y mínimos absolutos que pueden obtenerse del conjunto, no los que utilizaremos en la experimentación ya que habrá que adaptarse a las características de las membranas.

A la salida de la bomba de alta presión, el agua pasa por un tubo de acero AISI-316L de 1 ½ ” de diámetro y Schedule-40. En este tubo se ha colocado, ha continuación de la bomba, una válvula de retención también en AISI-316 y del mismo diámetro, con tubo de neopreno provisto de sus correspondientes platos brida y de 1 ½ ” de diámetro para una PN-70, con el fin de absorber las vibraciones que pudieran transmitirse da la bomba a la tubería.

Una vez se introduce el agua en la bomba de alta presión, ésta la envía al módulo de ósmosis inversa.

La bomba de alta presión tiene por misión enviar el agua de alimentación a la presión y caudal necesarios hacia el tubo de presión, con el fin de vencer la presión osmótica del agua .Esta presión osmótica a vencer, está en función de la salinidad del agua, por lo que el consumo de energía depende de la calidad del agua a tratar.

Tanto la presión de entrada a las membranas de ósmosis inversa, como la del concentrado y permeado se pueden observar con el indicador de presión.

6.2.1.3 Membranas y módulo de ósmosis inversa.



Figura 6-6 Vista general de la planta OPRODES

Se conformó un tubo Standard de 6 metros de longitud con 6 membranas. Las membranas elegidas para el proyecto fueron de la empresa KOCH – FLUID SYSTEMS modelo TFC 2822-SSpremium de poliamida con arrollamiento en espiral para la desalinización de agua de mar y

alto rechazo de sales. Cada membrana permite un flujo de perneado de 18.9 m³/día con un rechazo de cloruros del 99.8% disponiendo cada una de un área de 27.9 m².

Las especificaciones de diseño y operación son las siguientes:

Presión de operación típica:	5520 kPa
Presión de operación máxima:	8275 kPa
Temperatura de operación máxima:	45°C
Temperatura de limpieza máxima:	45°C
Concentración máxima de cloro libre:	<0.1 mg/l
Ph en operación continua:	4-11
Ph en operaciones de limpieza:	2.5-11
Máxima presión diferencial por elemento:	69 kPa
Máxima presión diferencial por tubo:	414 kPa
Máxima turbidez de alimentación:	1 NTU
Máximo SDI alimentación (test de 15 minutos):	5
Espesor del espaciador :	0.8 mm
Recuperación máxima por elemento:	7%

El tubo de presión están fabricados de fibra de vidrio con resina epoxi y se diseñan para soportar altas presiones, dependiendo del tipo de elementos usados y su aplicación, la máxima presión de operación para esos tubos de presión es de 45 Kg/cm² para aguas salobres y de 70 Kg/cm² para agua de mar.

La prueba de presión para esos tubos es de 1,5 veces la máxima presión de operación o de trabajo. Los tubos están diseñados para soportar una presión equivalente a 4 veces la presión máxima de trabajo.

Las membranas están instaladas dentro del tubo de presión una a continuación de otra, y con un interconector incluyendo sellos para el tubo central del permeado. Dependiendo de la presión de operación de las membranas, el montaje de la tapa es atornillado a ambos lados del tubo de presión con un anillo segmentado y con un acabado hermético por medio de una junta tórica y arandela de fijación. El montaje de la tapa consiste en una pestaña de acero con un forro interno de PVC.

El agua de alimentación entra al tubo de presión por un extremo y el agua producto es extraída del centro del conector. Interiormente, los elementos de las membranas están selladas contra el tubo de presión con un cierre hermético para evitar el paso de la alimentación entre este y el tubo de presión.

El agua producto y el agua de rechazo salen del tubo de presión por los extremos. El agua producto circula por un colector general de P.V.C. de diámetro 200, que lleva el agua al depósito existente. El agua de rechazo

Para poder controlar los caudales de salida se instalará un rotámetro visual de la firma Tec-Fluid para agua desalada. Al final del colector de salmuera se instala la válvula, pieza fundamental con la que regular la producción, ya que con ella se controla la presión del sistema. Se ha dispuesto además, en la salida del tubo de presión, una llave para tomas de muestras.

Una vez elegido el tubo de membranas y teniendo en cuenta la elección de la bomba, las características de funcionamiento de la planta serán:

Presión de funcionamiento mínima:	30 Bar
Presión de funcionamiento máxima:	66 Bar
Recuperación mínima:	10%
Recuperación máxima:	50%
r.p.m. mínima motor eléctrico:	800 r.p.m.
r.p.m. máxima motor eléctrico:	1500 r.p.m.
Potencia mínima consumida:	5.5 kW
Potencia máxima consumida:	21.5 kW

6.2.1.4 Sistema de limpieza.

La limpieza de las membranas se realiza de forma manual y se dispone de un depósito de 500 l. de P.V.C. Si hay una parada de de emergencia el agua limpia inunda la planta. O también, con ayuda de la bomba de alta presión se hace circular el agua por la instalación añadiendo productos químicos.

6.2.1.5 Tuberías

Las tuberías de la planta serán de diferentes características en función de la presión de trabajo.

- Baja presión: P.V.C. y caucho sintético
- Alta presión: Acero inoxidable 316 y caucho sintético reforzado.

6.2.1.6 Características del agua de la planta

Las características del agua de alimentación procedente del pozo costero perteneciente a la planta que es objeto del presente proyecto, se reflejan en el siguiente análisis realizado:

Calcio	Ca ⁺⁺	429,77 ppm
Magnesio	Mg ⁺⁺	1342,85 ppm
Sodio	Na ⁺⁺	9.900 ppm
Potasio	K ⁺	320 ppm
Carbonatos	CO ₃ ⁻	0 ppm
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	169,6 ppm
Sulfatos	SO ₄ ⁻	2.653,45 ppm
Nitratos	NO ₃ ⁻	0 ppm
Cloruros	Cl ⁻	17.377,17 ppm
Sílice	SiO ₂	44,5 ppm
Total Sólidos Disueltos	TDS	32.237,35 ppm

Tabla 6.2 Análisis de agua de alimentación a la planta

6.2.1.7 Instrumentación y Sistema de control

Debido a las características de investigación de la planta y a los resultados que de ella se quieren obtener, la planta estará fuertemente instrumentalizada y monitorizada, además y debido a la automatización de la misma tendrá un sistema de control adecuado. El sistema de control actúa sobre la válvula de rechazo y el variador de velocidad simulando de esta forma las condiciones de potencia variables a las que se vera sometida la planta en funcionamiento con fuentes energéticas no convencionales.

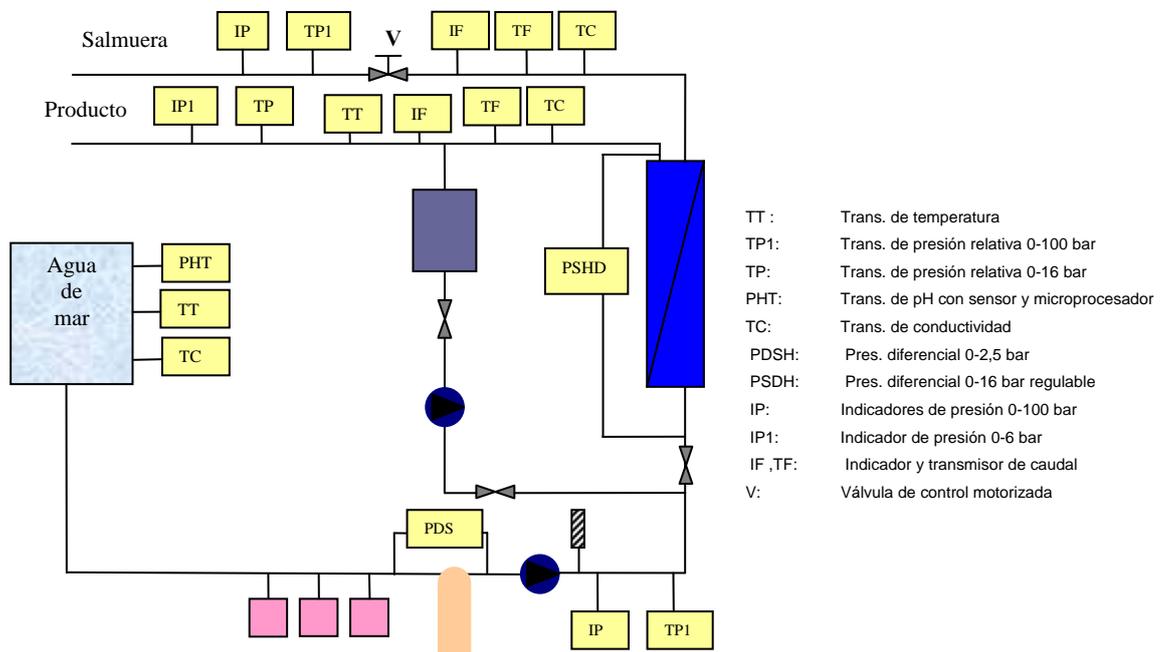


Figura 6-7 Instrumentación de la planta OPRODES

Descripción de los instrumentos:

- CT- Transmisor de conductividad, este instrumento transforma la señal de conductividad de un fluido en una señal eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA.
- FT- Transmisor de caudal, este instrumento transforma la señal del caudal en una señal eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA.
- LSH- Sensor que actúa sobre un contacto normalmente cerrado que se abre cuando el nivel de un depósito sobrepasa un determinado valor de consigna
- LSL- Sensor que actúa sobre un contacto normalmente cerrado que se abre cuando el nivel de un depósito cae por debajo de un nivel de consigna determinado
- PDSH- Sensor que actúa sobre un contacto cerrado que se abre cuando la presión entre dos puntos dados del circuito sobrepasa una presión dada
- PSL- Sensor que actúa sobre un contacto normalmente cerrado y que se abre cuando la presión detectada por este cae por debajo de la presión de consigna dada al sensor
- PT- Transmisor de presión que transforma una señal de presión en una corriente eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA., de tal forma que cuando la presión sea la que se le ha asignado como mínima, dará una salida de 4 mA., y cuando la presión sea la que se ha asignado como máxima, su salida será de 20 mA.
- TT- Transmisor de temperatura que transforma la señal de temperatura en una corriente eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA., de tal manera que hace corresponder al valor mínimo que se desea medir una corriente de 4 mA y al máximo una de 20 mA.

6.2.1.7.1 Sistema de control:



Figura 6-8 Autómata programable

- Autómata programable con 16 entradas analógicas, 32 entradas/salidas digitales, 8 salidas analógicas marca Telemecanique modelo TSX 37, software de programación de autómata PL7 micro y software de monitorización Monitor Pro
- Variador de velocidad de 30kW, software de conexión a PC y filtro de perturbaciones eléctricas, marca Telemecanique Altivar modelo ATV66D33N4S.
- Válvula de control de presión del sistema (rechazo de salmuera).

La válvula esta construida en acero inoxidable especial para agua de mar. Posee un actuador electro hidráulico con motor monofásico y presostatos para final de carrera.



Figura 6-9 Válvula de control motorizada

6.2.1.7.2 Instrumentación

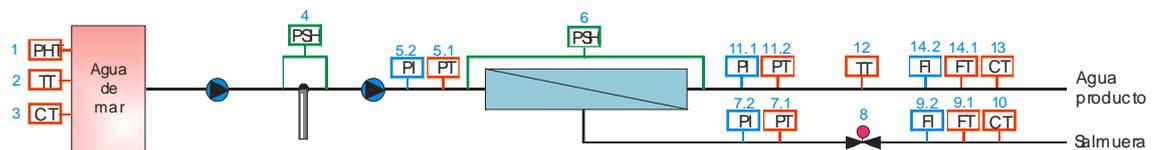


Figura 6-10 Esquema de sensores

- **Código 2 y 12: TT (transmisor de temperatura)**

El transmisor de Temperatura es del tipo RTD Pt-100 de 3 hilos. Posee un aislamiento mineral en óxido de magnesio con funda de acero inoxidable de 6 mm y el material de la vaina es acero inoxidable AISI 316. Protección de la cabeza del sensor IP65. Rango de temperatura de 0 a 50 °C.

Las siglas RTD significan dispositivo termo resistivo, Pt-100 es un tipo particular de dichos dispositivos y a 3 hilos se refiere al tipo de conexión del Pt-100.

Realmente el Pt-100 es un sensor de Temperatura que consiste en un alambre de platino que a 0°C le corresponden 100 ohms y que al aumentar la Temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas se encuentra la temperatura exacta a la que corresponde.



Marca: EIPSA
Modelo PT100
Rango: 10-50 °C
Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-11 Transmisor de temperatura

- **Código 5.1 y 7.1: PT** (transmisor de presión relativa 0-100 bar)



Marca: SCHOPPE&FAESER
Modelo ASD810
Rango: 3.33-100 bar
Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-12 Transmisor de presión

- **Código 11.2 : PT** (transmisor de presión relativa 0-16 bar)



Marca: SCHOPPE&FAESSER
 Modelo ASD810
 Rango: 3.33...100 bar
 Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-13 Transmisor de presión

El transmisor de presión ASD 800/ ASD 810 forma parte de de la serie AS 800. Lostransmisores de este tipo funcionan con la técnica de dos cables y tienen una señal de salida analógica de 4...20 mA. El transmisor contiene un microprocesador interno que permite realizar muchas funciones y da facilidad de operación.

El transmisor ASD 800 nos permite medir presiones parciales en vacío o niveles y el ASD 810 se utiliza para medir presiones absolutas de vapores, gases y líquidos. Los rangos de medida van desde los 60 mbar. hasta 600 bar.

El tipo material del transmisor en contacto con el fluido a medir dependerá de la resistencia a la corrosión que se precise.

En la planta se emplean los transmisores ASD 800 y hay que distinguir entre los que se utilizan para el agua de alimentación y rechazo, y el que se encuentra en la línea de agua producto.

- Equipo de medida en la línea del agua de alimentación y en la línea del rechazo:
 - Transmisor de presión relativa.
 - Protección de la cabeza del sensor IP65.
 - Rango: 0-100 bar.
 - Máxima sobrepresión: 200 bar.
 - Rango de calibración: 0-100 atm.
 - Material en contacto con fluido: HASTELLOY-C
 - Material diafragma: HASTELLOY-C
- Equipo de medida en la línea de agua producto:
 - Transmisor de presión relativa.
 - Protección de la cabeza del sensor IP65.
 - Rango: 0-16 bar
 - Máxima sobrepresión: 200 bar.

Rango de calibración: 0-6 atm.

Material en contacto con fluido: acero inoxidable AISI 316L

Material diafragma: AISI 316L

- **Codigo 3,10,13 :CT** (transmisor de conductividad)



Marca: Rosemount Analytical
400/401
Modelo: 2...2000 μ S (400)
Rango: 2000...200000 μ S (401)
Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-14 Transmisor de conductividad

Se trata de transmisores montados con dos hilos de campo. Ideal para instalaciones de varios bucles donde se requiere elaboración central de datos y control. Alta resistencia al agua y a la corrosión, un doble compartimento suministra máximo circuito de protección aumentando la fiabilidad en ambientes industriales.

En la planta se utiliza el modelo 1181 C de Rosemount Analytical,

- En la línea de producto, rango: 0-200 mS/cm
- En la línea de rechazo, rango: 0-2000 μ S/cm

- **Codigo 4: PDSH** (presostato diferencial 0-2,5 bar)



Marca: ETTORE
Modelo DW496UN
Rango: 0-2.5 bar
Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-15 Presostato diferencial

- **Codigo 6: PSDH** (presostato diferencial 0-16 bar)



Marca: ETTORE
 Modelo DW197UN
 Rango: 0-100 bar
 Señal de salida: 4...20mA

Figura 6-16 Presostato diferencial

Los presostatos diferenciales, como todos los instrumentos de presión diferencial, requieren especial cuidado en el diseño y ejecución de las uniones entre los puntos de medida y el instrumento, ya que la línea de conexión forma parte integrante del instrumento en la transmisión de la variable medida desde el punto de medida al mismo instrumento.

Su principio de funcionamiento está basado en que la presión diferencial, actuando sobre un elemento sensible a membrana, determina la deformación elástica utilizada para accionar, automáticamente, uno o dos microrruptores eléctricos posicionados en valores de actuación prefijados.

El instrumento debe montarse sobre un soporte rígido, exento de vibraciones.

En lo que respecta al conexionado de presión, las dos tuberías deben tener un trazado breve, longitud sensiblemente igual, el mínimo de racords de unión y tramos flexibles que impidan la aparición de tensiones mecánicas en las conexiones del instrumento, especialmente en presencia de dilataciones térmicas. Es muy importante verificar la estanqueidad de las uniones, que no existan pérdidas en el circuito.

En cuanto a la temperatura, el instrumento debe funcionar dentro de los límites de temperatura admitidos (normalmente de -20°C a $+70^{\circ}\text{C}$), de ser necesario, se tomarán las medidas adecuadas para mantenerla dentro de esos límites.

En la planta se dispone de las Series DPW & DPA de CELLA IBERICA, S.A. y son los siguientes:

- Equipo para la medida de la presión diferencial en el filtro. Rango: 0-2,5 bar.
- Equipo para la medida de la presión diferencial en las membranas: Rango: 0-16 bar.

- **Código 5.2, 7.2 : PI** (Indicadores de presión 0-100 bar)



Marca: NUOVA FIMA
Modelo MGS 18/2/A
Rango: 0-100 bar
Señal de salida: analógico

Figura 6-17 Manómetro

- **Código 11.2 : PI** (Indicador de presión 0-6 bar)



Marca: NUOVA FIMA
Modelo standard
Rango: 0-16 bar
Señal de salida: analógico

Figura 6-18 Manómetro

Los manómetros son instrumentos de precisión y se deben manejar con cuidado. Se recomienda seleccionar para cada manómetro un rango estándar cuyo valor fondo escala sea aproximadamente el doble de la presión de trabajo, con lo que se logrará prolongar la duración del aparato y al mismo tiempo se facilitará la lectura de la indicación que se efectuará en el centro de la esfera.

Deberá comprobarse que los materiales de las partes en contacto con el fluido de proceso (elemento sensible y racord) sean los adecuados para el tipo de fluido a medir.

En la planta se utiliza un equipo para medir la presión de agua dulce y otro para el agua salada.

- Equipo para medida de agua dulce:

Manómetros modelo MGS 18/2/A, DN 100, preparado para su relleno con baño de glicerina, caja Aisi 304, elemento sensible muelle tubular en Aisi 316 L, conexión a proceso rosca ½ " NPT M en Aisi 316 L, salida radial, visor cristal de seguridad.

Montaje local.

Presición: ± 1% valor fondo escala

Rango: 0-6 Bar

- Equipo para medida de presión en agua salada:

Manómetros modelo MGS 18/A/2, DN 100, preparado para su relleno con baño de glicerina, caja Aisi 304, elemento sensible muelle tubular en Aisi 316 L, conexión a proceso rosca ½" M en Aisi 316 L, salida radial, visor cristal de seguridad. Montaje local.

Con separador de membrana modelo MGS 9/1A0/S44 T, conexión a manómetro en Aisi 304, membrana en Aisi 316 L, conexión a proceso en Aisi 316

No desmontable.

Partes en contacto con el fluido recubiertas de PTFE.

Conexión rosca ½" GAS M

Presición del conjunto: ± 1,5 % valor fondo escala

Condiciones de servicio máximas:

T (°C)	85	60	25
P (bar)	40	50	100

Rango: 0-100 bar

- Código 9 , 14: FT FI** (Indicador y transmisor de caudal)



Marca: ENDRESS+HAUSER
 Modelo Promag 30
 Rango: 0-10 m³/h
 Señal de salida: 4...20 mA

Figura 6-19 Caudalímetro

En la planta se utiliza un caudalímetro de Endress y Hauser tipo Promag 30 (modelo '99). Este clase de equipos se utiliza para la medición de caudal en fluidos conductivos y en tubería cerrada.

El principio de funcionamiento está basado en la medición de un caudal electromagnético según la ley de Faraday, es decir, generación de un voltaje por inducción en un campo magnético. La velocidad de caudal es proporcional al voltaje inducido, medido por dos electrodos dentro del tubo de medida.

Se utilizan dos caudalímetros:

- En la línea de salmuera : 0-6,5 m³/h 80 bar.
- En la línea del producto: 0-2.5 m³/hora 5 bar.

El medidor puede montarse inclinado u horizontal siempre que se mantenga la tubería llena de líquido durante la medida. Si la instalación es inclinada es conveniente colocar una válvula aguas abajo para asegurar que la tubería esté llena para todos los caudales de líquido que puedan pasar a través. No obstante, si el sistema de bombeo se para, el nivel del líquido en el elemento deja de bañar los electrodos, abriéndose el circuito y dando una señal de salida errónea. Algunos fabricantes modifican ligeramente el circuito para que el índice del instrumento receptor señale cero cuando el circuito está abierto. Los instrumentos digitales detectan automáticamente el estado sin líquido de la tubería.

Generalmente no se requiere una longitud recta de tubería antes del medidor de caudal, sin embargo, la existencia de accesorios que pueden provocar la formación de filetes de caudal asimétricos, obliga a situar el elemento unos 5 diámetros de tubería o más a partir de la conexión aguas arriba. Asimismo cuando el elemento está colocado en la impulsión de una bomba se recomienda una separación de unos 8 diámetros de tubería.

- **Código 8: Válvula de control motorizada** para agua de mar y alta presión.



Marca: SAMSON
Modelo 3274
Rango: 0-30mm
Señal de salida: 4...20 mA

Figura 6-20 Válvula de regulación servopilotada

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. La válvula de control se utiliza para controlar la presión.

Una válvula de control típica se compone básicamente del cuerpo y del servomotor.

El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

La planta dispone de una válvula de control de presión del sistema para el agua de rechazo.

La válvula esta construida en acero inoxidable especial para agua de mar. Posee un actuador electrohidráulico con motor monofásico y presostatos para final de carrera.

- **Sensor de conductividad**

Los sensores de conductividad son de diseño sencillo y mediciones precisas. Los materiales de que están hechos son de alta durabilidad y resistencia a la corrosión. No requieren calibración. Disponen de unos electrodos de titanio robustos disponibles con células constantes. El electrodo incluye un sensor de temperatura del tipo Pt-100.

En la planta se utilizan los modelos 400, en la línea de agua producto, y 401, en la línea de rechazo, de la casa Rosemount Analytical.

- **Sensor de pH**

El sensor empleado en la planta es un sensor compacto redox CPF 10. El electrodo incluye un sensor de temperatura Pt-100. Sus características más importantes son, Rango: 1-12 pH, Temperatura máxima: 80°C y presión máxima: 6 bares. Son sensores de fácil instalación. Poseen un diafragma PTFE que repele la suciedad y previene las obstrucciones y así asegurar una medición precisa durante un largo periodo. Con un conducto o tubería pueden ser sumergidos en un tanque.

- **Transmisor de pH**

El transmisor de pH que se emplea es el CPM 252 de Endress y Hauser. Posee un microprocesador y da valores de pH y Temperatura; un recubrimiento del campo con una protección del sensor del tipo IP 65 y un sensor de temperatura Pt-100. El rango de medida de pH va de 0 a 14 con unos valores de temperatura de -9,9 a 125°C.

- **Transductor de nivel**

Para llevar a cabo el control de los niveles de los diversos tanques se utilizan transmisores de nivel tipo Emul de Danfoss.

Este transmisor de nivel está constituido por un transductor de ultrasonido y un convertidor de señal. Este último proporciona una señal analógica de salida de corriente de 4 a 20 mA proporcional al nivel de la superficie del líquido. Es usado principalmente para la medida de

niveles de agua en plantas de tratamiento de aguas. Su diseño robusto garantiza una gran fiabilidad y una larga vida útil bajo severas condiciones ambientales.

Ventajas que proporciona el transductor de nivel que se utiliza:

- Compensación óptima de la temperatura con referencia a la presión
- No existe la necesidad de limpieza del elemento, puesto que el transductor no está en contacto físico con el medio
- No requiere calibración periódica
- Los tres diferentes rangos de medida proporcionan una buena resolución de la medida
- Aislamiento galvánico entre la alimentación, la electrónica y el transductor
- Instalación y mantenimiento sencillos
- El convertidor de señal insertado puede ser reemplazado sin necesidad de desconectar cables
- Compatibilidad entre todo tipo de convertidores de señal y transductores

6.2.1.7.3 Autómata programable

En base a equipos actuales, un Autómata Programable (AP) se puede definir como un equipo electrónico el cual realiza la ejecución de un programa de forma cíclica. La ejecución del programa puede ser interrumpida momentáneamente para realizar otras tareas consideradas más prioritarias, pero el aspecto más importante es la garantía de ejecución completa del programa principal.

La potencia de un AP está directamente relacionada con la velocidad de ejecución del programa y las variables tratadas. Un AP del mercado actual tarda unos 0,15 ms por cada Instrucción, o sea que el resultado es perfecto para el control de cualquier automatismo. El fin de dicha ejecución es provocar el cambio de las variables tratadas. Este cambio sobre las variables se realiza antes, durante y al final del programa. Antes del programa se realiza la lectura de las Entradas (inicio de ciclo), al final se realiza la escritura de las Salidas (fin de ciclo y enlace con el inicio). Durante la ejecución del programa se realiza la lectura y/o escritura de las variables internas según el contexto programado.

En la planta se utiliza un Autómata programable con 16 entradas analógicas, 32 entradas/salidas digitales, 8 salidas analógicas marca Telemecanique modelo TSX 37, software de programación de autómata PL7 micro y software de monitorización Monitor Pro.



Figura 6-21 Autómata programable

El autómata es el encargado de gestionar todas las señales que se generan en el sistema. Estas señales se pueden dividir en cuatro grupos:

- Señales analógicas de entrada: son señales eléctricas que oscilan entre 4 y 20 mA, y que provenientes de los transmisores, “entran” en el autómata.
 - Señales digitales de entrada: son señales denominadas normalmente de “0” o “1”. Proviene de los sensores y se corresponden con un contacto abierto o cerrado. Como las anteriores también son recibidas por el autómata.
 - Señales analógicas de salida: son señales eléctricas que varían entre 4 y 20 mA pero que ahora son generadas por el autómata en función de un programa previamente establecido. Salen del autómata y son recibidas por algún elemento de la planta.
 - Señales digitales de salida: análogamente a las de entrada son señales de “0” o “1”, pero en este caso las genera el autómata con un determinado nivel de tensión y son recibidas por algún dispositivo de la planta.
- Señales analógicas de entrada:

CT-301: Transmisor de conductividad que convierte una señal de conductividad en una señal eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA. Está situado a la salida de la membrana en el lado de agua producto, midiendo la conductividad del producto.

CT-302: Transmisor de conductividad análogo al anterior, pero situado a la salida del tubo de membranas en el lado del agua de rechazo. Por lo tanto mide la conductividad de la salmuera.

FT-301: Transmisor de caudal que convierte una medida de caudal en una señal eléctrica de entre 4 y 20 mA. Está situado a la salida del tubo de membranas en el lado del agua producto midiendo por tanto su caudal.

PT-300: Transmisor de presión, que convierte una señal de presión en una señal eléctrica comprendida entre 4 y 20 mA. Está situado a la entrada del tubo de membranas y se utiliza para medir presión de alimentación.

PT-302: Transmisor de presión análogo al anterior, pero en este caso situado a la salida del tubo de membranas por el lado de agua de rechazo.

TT-301: Transmisor de temperatura, que convierte una medida de temperatura en una señal eléctrica que oscila entre 4 y 20 mA. Situado a la salida del tubo de membrana para medir la temperatura del agua producto.

- Señales digitales de entrada.

LSH-400: Sensor que abre un contacto cuando el nivel en el tanque de limpieza o inundación del tubo de membranas se encuentra por encima de un límite prefijado.

LSL-100: Sensor que abre un contacto cuando el nivel en los depósitos de dosificación destinados al pretratamiento del agua de alimentación se encuentra por debajo de un límite prefijado.

LSL-400: Sensor que abre un contacto cuando el nivel en el tanque de limpieza se encuentra por debajo de un límite prefijado

LSL-401: Sensor que abre un contacto cuando el nivel de los depósitos de dosificación destinados a la limpieza de las membranas se encuentra por debajo de un límite prefijado

PSL-200: Sensor que abre un contacto si la presión es inferior a un valor dado en la entrada de la bomba de alta presión

- Señales analógicas de salida.

Señal que va al variador de velocidad

Señal que va a la válvula de aguja

- Señales digitales de salida.

Todas las señales de todo o nada, como son las válvulas de bola, el on/off de las bombas, etc.

El diseño de la aplicación se realiza mediante software de programación de autómatas PL7 micro y software de monitorización Monitor Pro.

6.2.1.8 Variador de velocidad

Los variadores de velocidad, también llamados convertidores de frecuencia, son dispositivos utilizados para regular los procesos industriales. Se trata de equipos utilizados en múltiples aplicaciones.



Figura 6-22. Autómata programable y variador de velocidad

El término variador de velocidad incluye una amplia variedad de motores controlados mecánica, neumática y electrónicamente cuya velocidad se puede variar. El variador constaría de:

- El convertidor de entrada transforma corriente alterna en corriente continua, necesaria para los transistores de potencia controlados electrónicamente del inversor de salida
- El enlace de continua es la fuente de potencia del inversor de salida. Los variadores de velocidad de gran potencia tienen un gran banco de condensadores para almacenar carga eléctrica procedente de la entrada.
- El inversor de salida proporciona una tensión y una frecuencia variables en alterna. La tensión y la frecuencia se varían a la vez para obtener un par constante con velocidad variable, o se varían en distinta proporción, para obtener un par variable a distintas velocidades.
- Los circuitos de control temporizan la conmutación de los circuitos de E/S y transportan comandos desde el panel de control del operador. También monitorizan la aparición de fallos de funcionamiento y la existencia de condiciones de funcionamiento incorrectas, informando al operador. Si es necesario, los circuitos

de control para el variador de velocidad para proteger el motor o el inversor de salida.

En la planta se ha optado por un variador de velocidad de 30kW, software de conexión a PC y filtro de perturbaciones eléctricas, marca Telemecanique Altivar modelo ATV66D33N4S.

- Accionamiento y prestaciones:

Este tipo de convertidor de frecuencia está destinado al control de motores asíncronos trifásicos de jaula en una escala de potencia de 0,75 a 220 kW. Es un variador modular y evolutivo que se adapta a los entornos industriales y a aplicaciones de todo tipo gracias a un amplio conjunto de accesorios y complementos.

El altivar 66 cuenta con el nuevo sistema de accionamiento PRO System, que aporta soluciones a las aplicaciones más exigentes gracias a las siguientes funciones:

- Control vectorial del flujo con o sin captador
- Nuevos algoritmos de control de flujo
- Adaptación automática de los parámetros específicos del motor

El variador se puede configurar para las aplicaciones:

- De par constante
- De par variable

- Autoajuste:

El variador está ajustado de fábrica para satisfacer las aplicaciones más corrientes:

- Sobrepar para garantizar el arranque en caso de rozamiento seco o resistencia mecánica
- Par máximo disponible sin ajuste desde las velocidades reducidas
- Adaptación automática de los tiempos de las rampas de aceleración y deceleración en caso de sobrepasar las posibilidades del par

- Disminución del ruido del motor

Para una utilización con par constante o par variable, el troceado de alta frecuencia (4 kHz o 10 kHz para algunas aplicaciones) de la tensión continua intermedia filtrada, permite suministrar al motor una onda de corriente con un bajo nivel de armónicos. Esta frecuencia de troceado está modulada de forma aleatoria para disminuir el ruido del motor, limitando las frecuencias de conmutación y por tanto las pérdidas en el variador.

- Diálogo

Un terminal gráfico de utilización se encuentra en la parte frontal del variador. Muestra explícitamente diversos menús que permiten:

- Elegir el idioma de diálogo (entre 7 idiomas)
 - Identificar el variador
 - Visualizar las magnitudes de explotación o los fallos
 - Reajustar y configurar el Altivar
 - Seleccionar el comando local del teclado
-
- Pantalla de cristal líquido que permite visualizar barras gráficas, con vídeo inverso para destacar textos, códigos o valores numéricos
 - Conmutador de enclavamiento de acceso (situado detrás del terminal) para impedir o permitir la programación
 - Posibilidad de salvaguardar los ajustes en una tarjeta PCMCIA que se puede instalar en el variador, para su telecarga sucesiva en un número cualquiera de Altivar 66.
 - Indicación mediante 3 leds en la parte frontal del variador:
 - Led rojo encendido: Altivar en defecto
 - Led amarillo encendido: Altivar con limitación de corriente
 - Led verde encendido: Altivar conectado

Toda la instrumentación ira conectada al autómeta y el control de la válvula de rechazo así como el variador es manejado por el mismo bajo instrucciones enviadas por el PC y el programa SCADA (Monitor Pro).

Los planos de montaje del sistema de control los podemos observar en las siguientes páginas.

Integración de la energía eólica con la planta de ósmosis inversa.

7.1 Curva Característica de una Planta de O. I.

La cantidad de agua producto requerida por día es el factor principal a la hora de diseñar una planta ósmosis inversa.

Fijada la demanda, se decide la topología de la instalación así como el tipo de membrana a instalar. De esta manera queda fijado tanto el tamaño de la planta, como el rango de funcionamiento de la misma. Esto se comprueba visualizando la Figura 7.1, donde se muestra el funcionamiento de la instalación.

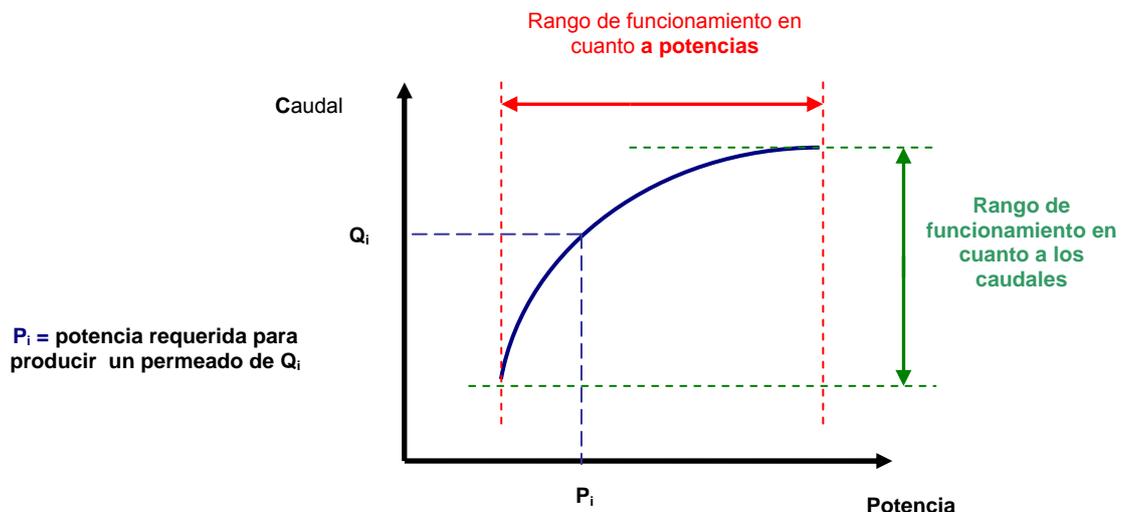


Figura 7.1: Curva P-Q de una instalación de ósmosis inversa.

Existe una relación entre el caudal de agua que se puede obtener en la instalación y la cantidad de energía que se dispone. Este hecho se desprende de la expresión de Van't Hoff que se cumple en el proceso OI:

$$W = \pi \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \Rightarrow \quad \frac{W}{s} = \frac{\pi \cdot V}{s} \quad \Rightarrow \quad Pot = \pi \cdot Q$$

en donde π = presión osmótica.

Esta expresión en las membranas OI queda de la forma:

$$Pot = P_a \cdot Q_a$$

Donde

Pot = potencia requerida por las membranas para realizar el proceso

Pa = presión de alimentación de las membranas

Qa = caudal de alimentación

Según la presión requerida en la membrana y el caudal de alimentación manejado, se calcula la potencia requerida por la bomba de alta presión, teniendo en cuenta también la eficiencia (la caída de presión en la entrada de la membrana es del orden de 10%, además de las pérdidas por taponamiento), mediante la siguiente ecuación:

$$P_{bomba} = \frac{P_a \cdot Q_a}{\eta_{bomba}}$$

donde,

Pbomba = Presión requerida por la bomba (kW)

Pa = Presión de alimentación en la membrana (bares)

Qa = Caudal de alimentación (m³/h)

ηbomba = Eficiencia de la bomba

Ésta será la potencia que requiera la bomba. Pero la bomba funciona gracias a un motor que lleva acoplado y que es el que alimenta a la misma.

$$P_{motor} = \frac{P_{bomba}}{\eta_{motor}}$$

Con la elección de un grupo motor-bomba que alcance dicha potencia se asegura el poder obtener las máximas cuantías de producción de agua si se dieran las condiciones energéticas para lograr conseguir dicha potencia.

La

Figura 7.1 muestra cuál es el rango de funcionamiento de la instalación, tanto desde el punto de vista de la energía necesaria para realizar el proceso, como del caudal que se puede obtener en la instalación. La gráfica es exclusiva para un tipo de membrana y para una topología de la planta. De manera que si se cambia alguna de estos dos factores, los puntos de esta gráfica se modificarán. O sea, que para cada topología y membrana se tiene una curva características de este tipo.

7.2 Régimen Variable

La mayoría de las plantas de ósmosis inversa operan bajo condiciones constantes, esto es, con todas las variables de entrada constantes: potencia, presión y caudal. El empleo de suministro de potencia variable, por ejemplo de un aerogenerador, provoca dos cambios en las condiciones de operación de una planta de OI:

- Operación irregular de la planta dependiendo de la disponibilidad de viento.
- Operación con potencia variable de la planta de OI dependiendo de la velocidad del viento en cada momento.

El primer cambio en las condiciones de operación de la planta no causa mayores dificultades si se elige en cada caso el procedimiento de puesta marcha y de parada adecuado para prevenir posibles daños en las membranas.

El segundo cambio necesita un análisis más profundo. Las características propias de los módulos de membranas establecen restricciones en la capacidad de una planta de OI para resistir el suministro de potencia variable.

Feron (1985) estableció el rango de operación de los módulos de ósmosis inversa Figura 7.2, basándose en las restricciones que se desprenden de las características de las membranas de fibra hueca, esto es:

- La máxima presión de alimentación impuesta por la resistencia mecánica de las membranas.
- El máximo caudal de salmuera (un caudal de salmuera muy elevado puede deteriorar mecánicamente la membrana).
- El mínimo caudal de concentrado (un caudal dentro de la membrana muy bajo puede favorecer la precipitación de ciertos constituyentes del agua de mar).
- La concentración de sales del agua producto. Si la presión aplicada es menor que un determinado valor, la concentración sería demasiado alto.



Figura 7.2. Rango de operación de un módulo de ósmosis inversa.

Posteriormente, Miranda y Infield (2002) y Pohl et al (2009) se basan en estos límites operacionales para estudiar el comportamiento teórico de una planta de ósmosis inversa funcionando con energía eólica en condiciones de operación variables. Esto quiere decir que el sistema siempre estará obligado a fijar su punto de funcionamiento dentro del rango de operación permitido.

De esta manera, el sistema puede funcionar autónomamente en un rango de potencia mayor, sin necesidad utilizar otro suministro de potencia o algún sistema de almacenamiento. Los efectos globales consisten en una reducción de los costos de capital y operación. Sin embargo, se conoce muy poco de las consecuencias que tiene sobre las membranas este funcionamiento en condiciones variables, aunque se acepta que la fatiga mecánica se produce antes y que la vida de las membranas se acorta.

Para las membranas de arrollamiento en espiral se pueden considerar los siguientes valores genéricos para los límites de operación:

- La máxima presión de alimentación es de 70 bares (1.0145e+003 psi).
- Mantener un caudal de alimentación a las membranas que debe ser menor de 72 m³/d (1.9022e+004 gpd) para membranas de 4" y menor de 288 m³/d (7.6090e+004 gpd) para membranas de 8".
- Mantener un caudal de barrido de la salmuera mayor de 14.4 m³/d (3.8045e+003 gpd) en membranas de 4" y mayor de 57.6 m³/d (1.4954e+004 gpd) en membranas de 8".
- La concentración de sales del agua producto, la cual no debe superar los límites permitidos para el agua potable (500 mg/l).

Teniendo en cuenta los valores de los límites anteriores suministrados por el fabricante, se obtiene el rango de funcionamiento para un tubo de seis membranas de FILMTEC. FLUID SYTEMS SW30HR-380 que se muestra en la Figura 7.3

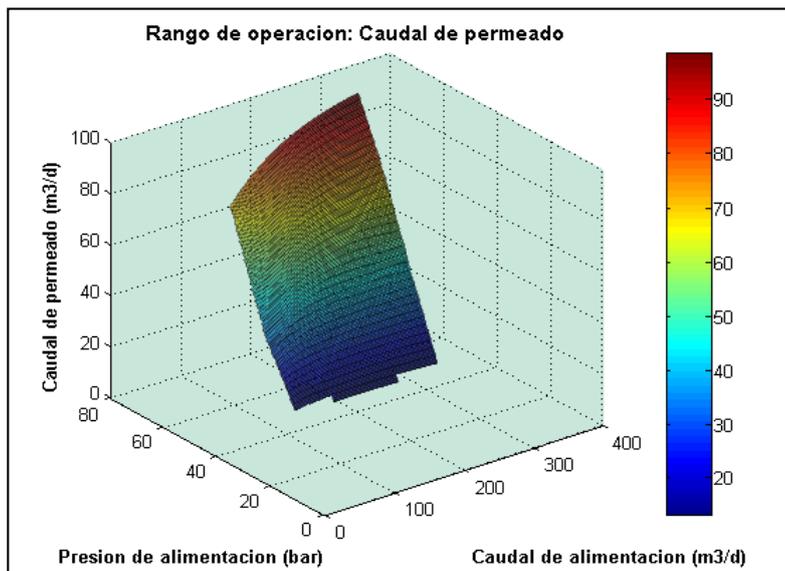


Figura 7.3: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380

Los valores máximos y mínimos que se han obtenido para cada una de las variables, considerando únicamente los límites recomendados por los fabricantes de las membranas.

RESULTADOS		Minimo	Maximo
Presion			
alimentacion		33.15	69
salida		30.0499	67.8692
Caudal			
alimentacion		87.6077	311.608
permeado		13.1766	98.4159
concentrado		57.6184	276.941
Conversion		0.232183	0.548468
Concentracion			
permeado		74.9258	499.81
concentrado		34760	72990.6
Potencia			
bomba		4.32842	31.1067
recuperada		0	0
motor		4.80935	34.563
Energia especifica		4.68595	26.1959

Tabla 7.1: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380.

Si proyectamos la superficie sobre el plano horizontal, obtenemos el rango de funcionamiento en cuanto a presión y caudal de alimentación se refiere que se muestra en la Figura 7.3. El límite inferior de presión corresponde a la presión mínima suficiente para que la instalación comience a producir (34.15 bar). Esta presión nunca podrá ser inferior a la presión osmótica del agua de alimentación (23.89 bar para el agua de alimentación considerada). El límite superior de presión desciende ligeramente a medida que aumenta el caudal de alimentación para no superar el caudal de permeado límite impuesto por los fabricantes de las membranas.

Por otro parte, el caudal de alimentación mínimo aumenta con la presión con el fin de mantener el caudal de concentrado por encima del límite hidráulico que garantiza el flujo adecuado para minimizar la precipitación de sales y, el consiguiente ensuciamiento de las membranas. Para presiones muy pequeñas el límite inferior para el caudal de alimentación también debe aumentar para no superar la máxima concentración de sales permitida en el caudal de permeado. En cuanto al caudal de alimentación máximo está limitado por el valor recomendado por los fabricantes de las membranas. En este caso no se han tenido en cuenta los límites impuestos por la bomba de alta presión.

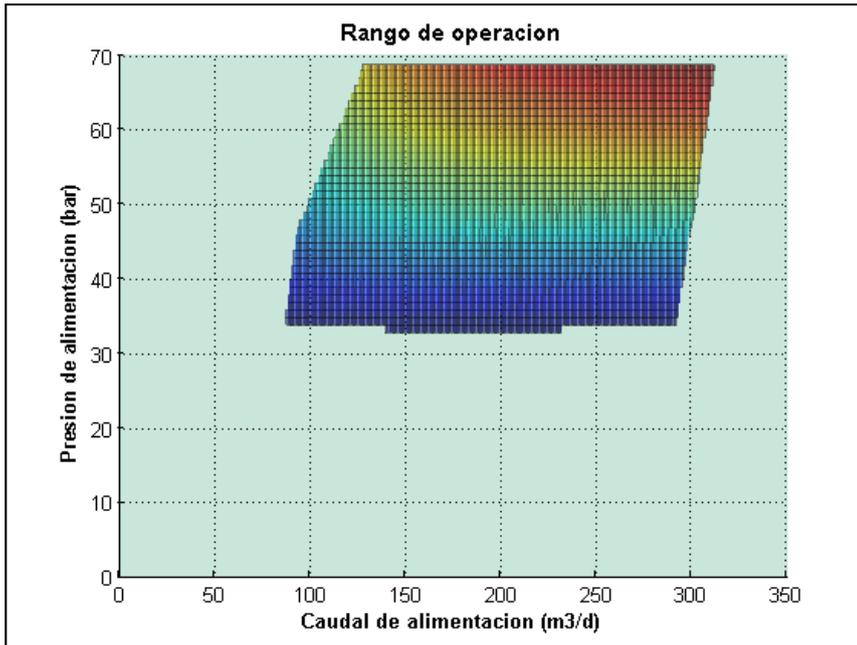


Figura 7.4: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380:

Si se toma como referencia para el rango de funcionamiento el caudal de permeado que suele ser de mayor interés, se obtiene la figura 7.5. El límite inferior para el caudal de permeado queda definido por una combinación del caudal mínimo de concentrado y la concentración máxima de sales. El límite superior por el contrario, queda definido por la superposición de los caudales máximos de alimentación y permeado suministrados por los fabricantes de las membranas. Sin embargo, el área que se determina para el caudal de permeado es más reducida, por lo tanto, el rango de producción de caudales es, evidentemente, más restrictivo.

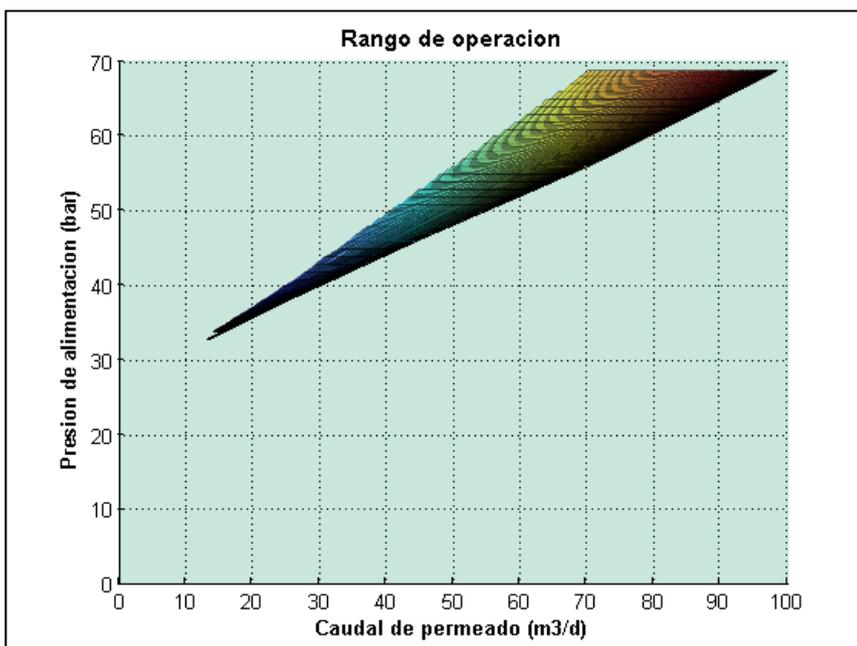


Figura 7.5: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380

Los puntos de funcionamiento deben cumplir la restricción en cuanto a la concentración máxima de sales permitida para el agua potable, esto es, la concentración de permeado para todos los puntos debe ser inferior a 500 mg/l.

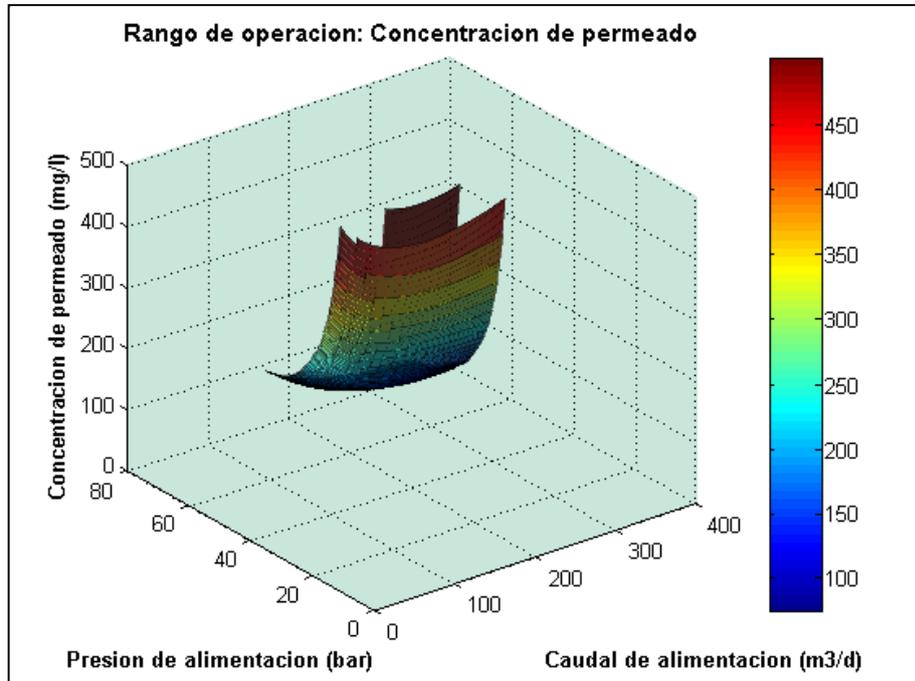


Figura 7.6: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380

A efectos de la integración con la potencia eólica podemos representar el rango de funcionamiento en cuanto a la potencia que necesita el módulo para producir el caudal de permeado,

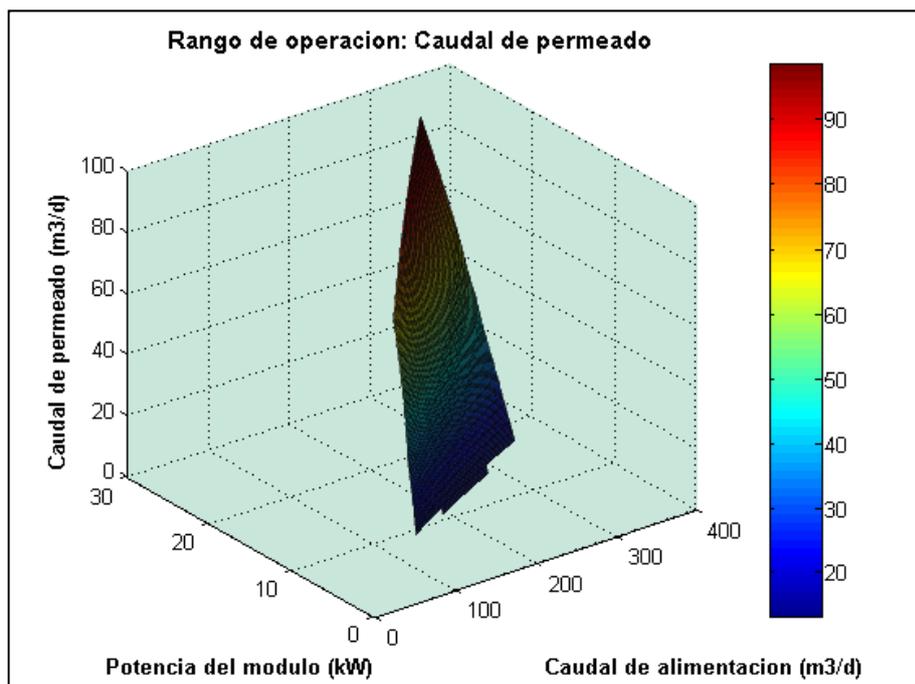


Figura 7.7: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380

En la figura 7.7, se puede observar la relación entre la potencia y caudal de permeado para los diferentes valores del caudal de alimentación que podemos controlar a nuestro interés en la instalación. Para cada valor de potencia que se suministra al módulo de membranas el valor del caudal de permeado producido queda definido por el valor que se fije para el caudal de alimentación.

Si proyectamos la superficie sobre los ejes y-z, de la potencia y el caudal de permeado, se pueden obtener la región de curvas características de la instalación (Figura 7.). Esta gráfica acota los valores de caudal de permeado que se pueden producir para cada valor de potencia que se suministra al módulo de membranas. Obviamente, de todas las curvas características representadas la ideal sería la que defina la producción de caudal de permeado máxima que coincide con la curva que acota el límite superior de la región de funcionamiento.

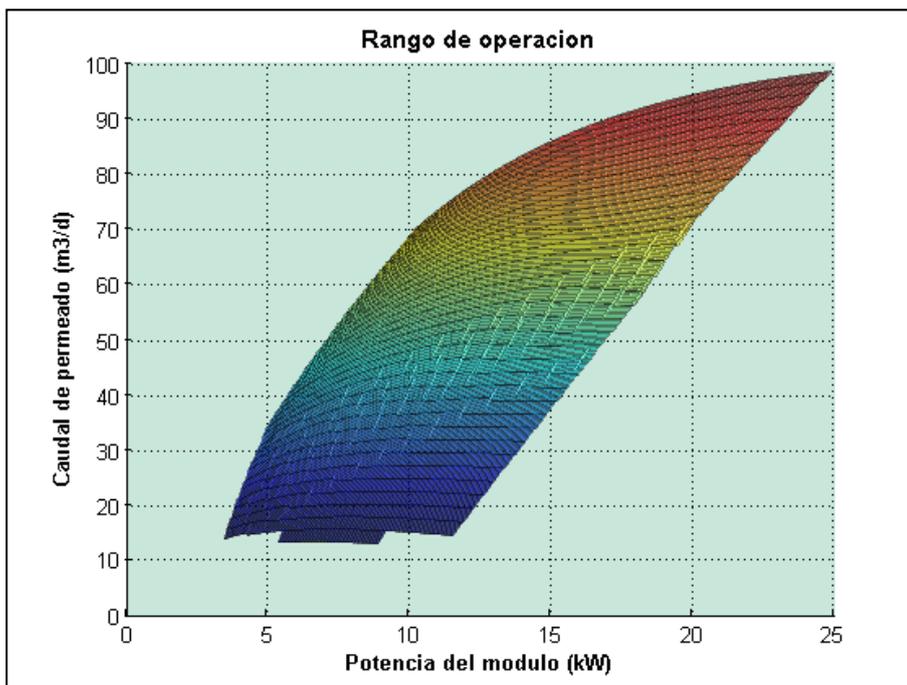


Figura 7.8: Rango de funcionamiento para un tubo con seis membranas SW30HR-380:

Si el sistema opera con suministro de potencia constante, el punto de funcionamiento considerado constante se define en base al caudal de permeado de diseño. Éste lleva asociado una potencia que necesita el módulo de ósmosis para producir dicho caudal como se ha mostrado en la curva característica de una instalación de la

Figura 7.8.

Sin embargo, en un sistema autónomo con energía renovable, la producción de agua está supeditada a las fluctuaciones energéticas propias del tipo de fuente renovable. Esto tiene

como consecuencia, el no poder establecer un nivel fijo de producción de agua, sino que los niveles de producción de agua varían en función de las disposiciones energéticas que haya. Por lo tanto, se debe tener presente que la planta va a estar funcionando sobre un rango de producciones distintas.

Esto quiere decir que el punto de funcionamiento ya no se puede considerar constante. Por el contrario el punto de funcionamiento en cada instante vendrá determinado por la cantidad de potencia que puede suministrar el aerogenerador, que a su vez es función de la velocidad del viento disponible en ese instante a través de la curva de potencia característica del mismo (Figura 7.).

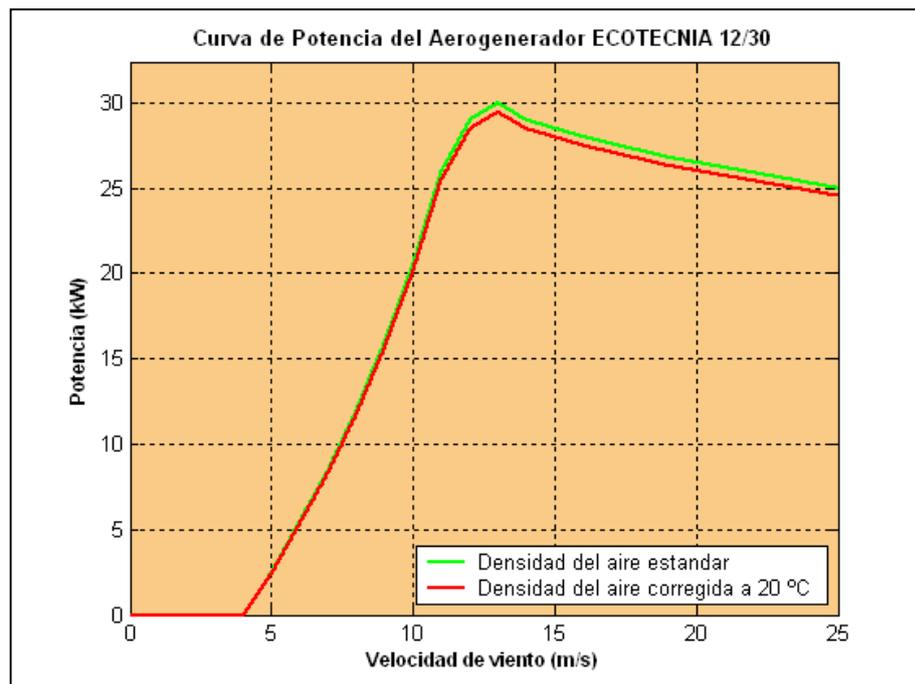


Figura 7.9: Curva de Potencia característica del aerogenerador ECOTECNIA 12/30.

Una vez fijada la potencia de todos los puntos posibles de funcionamiento dentro del rango se elige el de mayor caudal de permeado. Siguiendo este criterio de máximo caudal, podemos dibujar una curva característica para la instalación dentro del intervalo de potencia que puede suministrar el aerogenerador en función de la velocidad del viento (Figura 7.). De esta forma, se fija el valor de la producción de caudal de permeado para cada valor de potencia que se suministra al módulo de membranas.

Teniendo en cuenta las relaciones en cadena que se han establecido: la velocidad del viento con la potencia del aerogenerador y ésta, a su vez con el caudal de permeado producido, se puede definir, de manera análoga, una relación directa de la producción de caudal en función de la velocidad del viento, Figura 7..

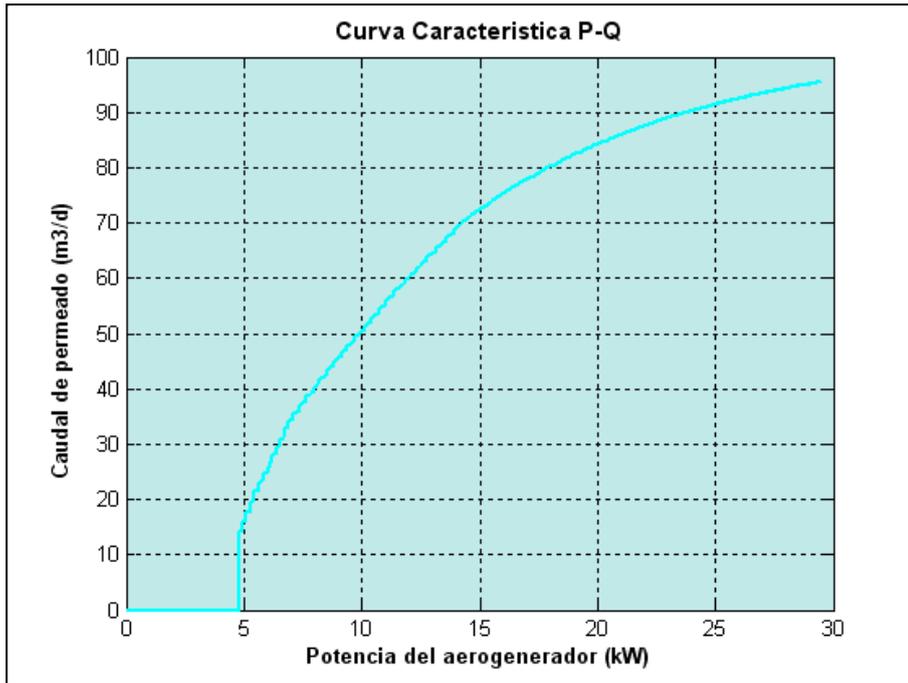


Figura 7.10: Curva de Caudal de Permeado vs Velocidad del Viento.

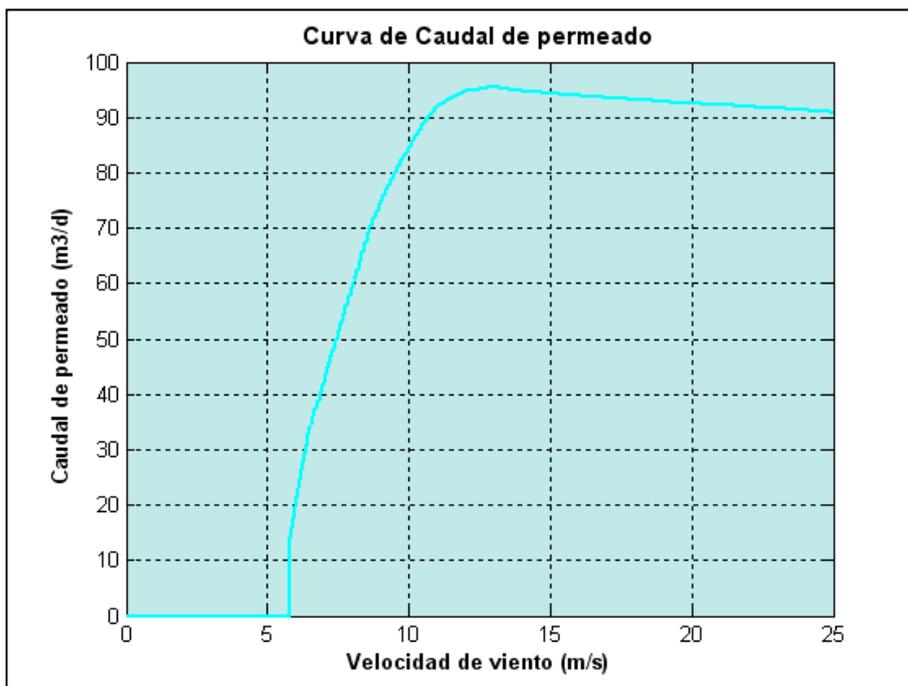


Figura 7.11: Curva de Caudal de Permeado vs Velocidad del Viento.

Se ha desarrollado el modelo de cálculo para evaluar la distribución de viento y estimar el potencial eólico disponible a lo largo de un periodo de tiempo que suele ser de un año. De esta manera, podemos obtener una curva de distribución de potencia anual generada por una turbina eólica mediante la curva de potencia del aerogenerador. En la Figura 7.12 se han agrupado las tres curvas de distribución anual: velocidad del viento, potencia del aerogenerador y caudal de permeado.

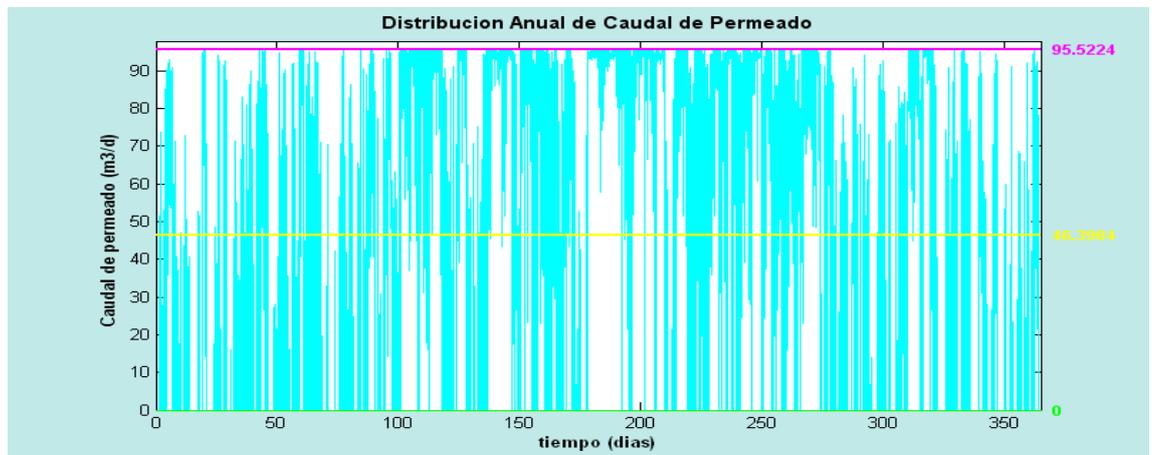
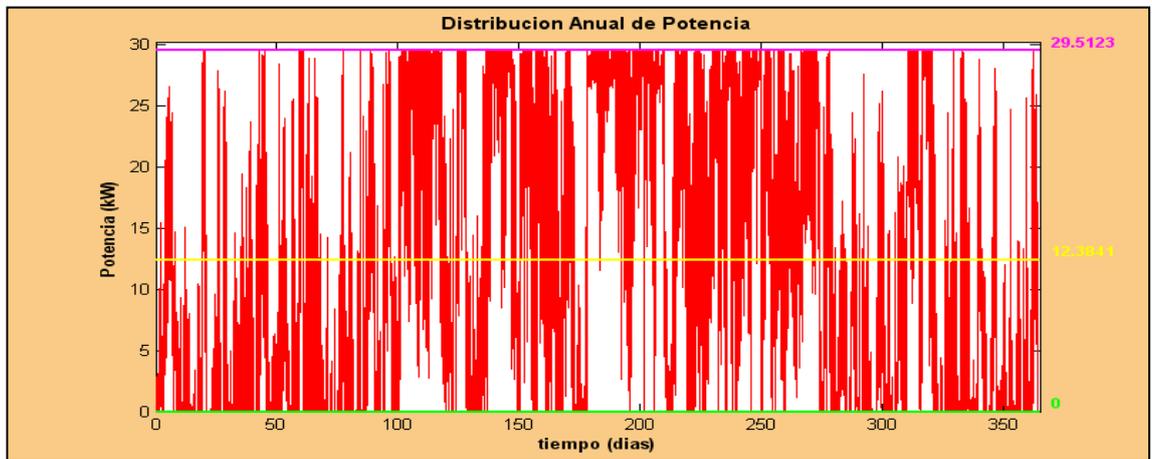
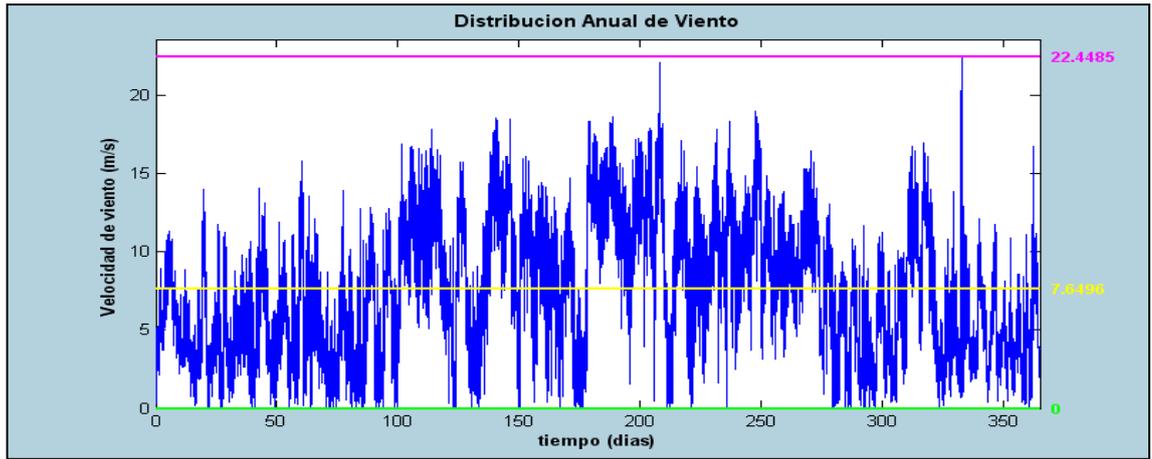


Figura 7.12: Distribución Anual de Viento, de Potencia, de Caudal de Permeado.

Sin embargo, estas curvas pueden resultar confusas en algunos casos. Si se realiza un análisis estadístico de los datos, dividiendo el intervalo de variación de cada variable en clases, se puede calcular la frecuencia de cada clase para las tres variables: velocidad del viento (Figura 7.13), potencia del aerogenerador (Figura 7.14) y caudal de permeado (Figura 7.15). De esta manera se observa claramente en que valores de producción se mueve la planta a lo largo del año. De la distribución de potencia generada se deduce que la instalación funcionará en régimen variable un 57.97 % del tiempo produciendo valores de caudales entre 10 y 90 m³/d.

También resultan interesantes las curvas de duración en las que se representan las horas acumuladas a lo largo del año para los valores de: velocidad de viento (Figura 7.16), potencia del aerogenerador (Figura 7.17) y caudal de permeado (Figura 7.18). Ya que se puede prever cómo se distribuye en el tiempo la producción a lo largo del año. De la curva de duración de caudal se deduce que la planta tendrá un nivel de producción superior a 50m³/d durante 4000 horas al año.

A priori parecería rentable la producción anual de la planta, sin embargo, se necesitaría un análisis más exhaustivo de caso, introduciendo fundamentalmente parámetros económicos para argumentar conclusiones definitivas.

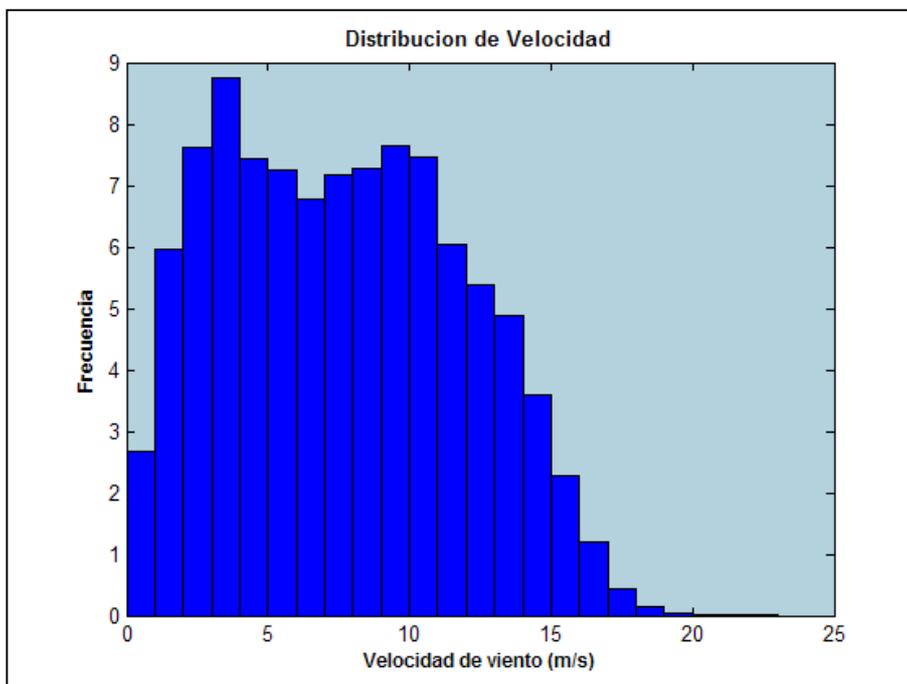


Figura 7.13: Distribución de Frecuencia para la Velocidad del Viento.

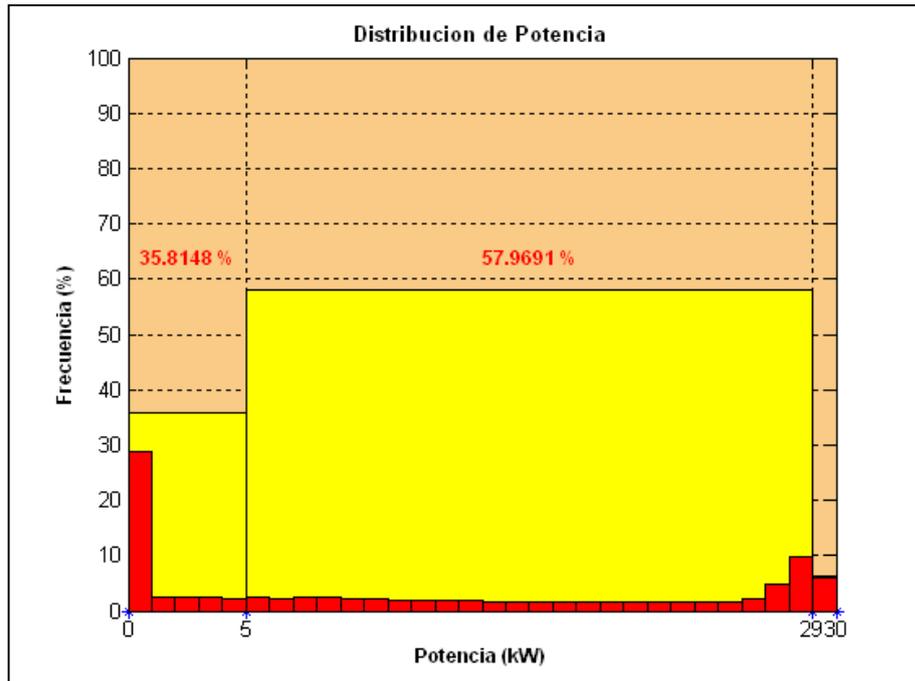


Figura 7.14: Distribución de Frecuencia para la Potencia del Aerogenerador.

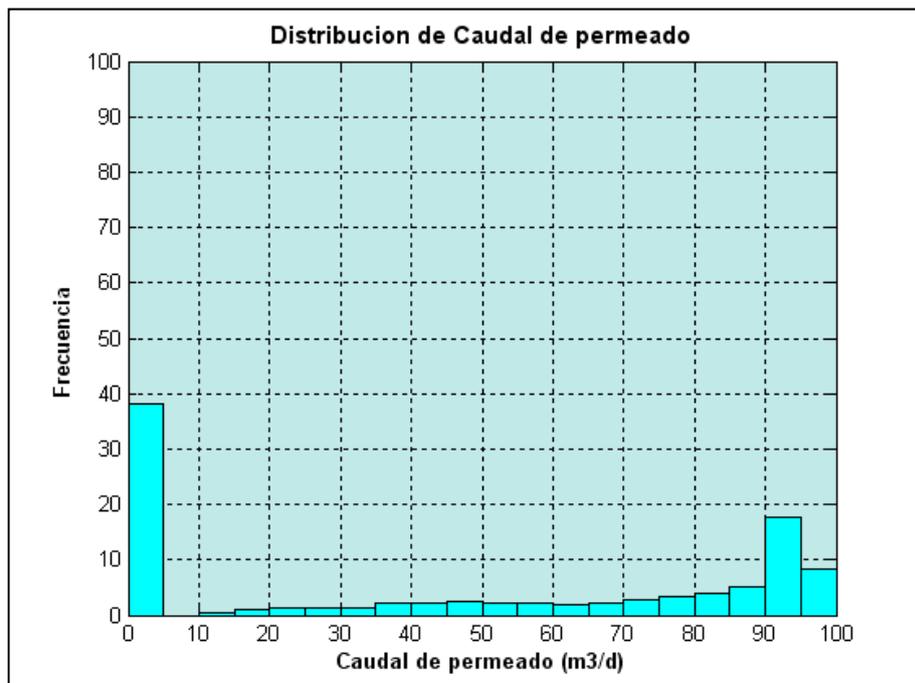


Figura 7.15: Distribución de Frecuencia para el Caudal de Permeado.

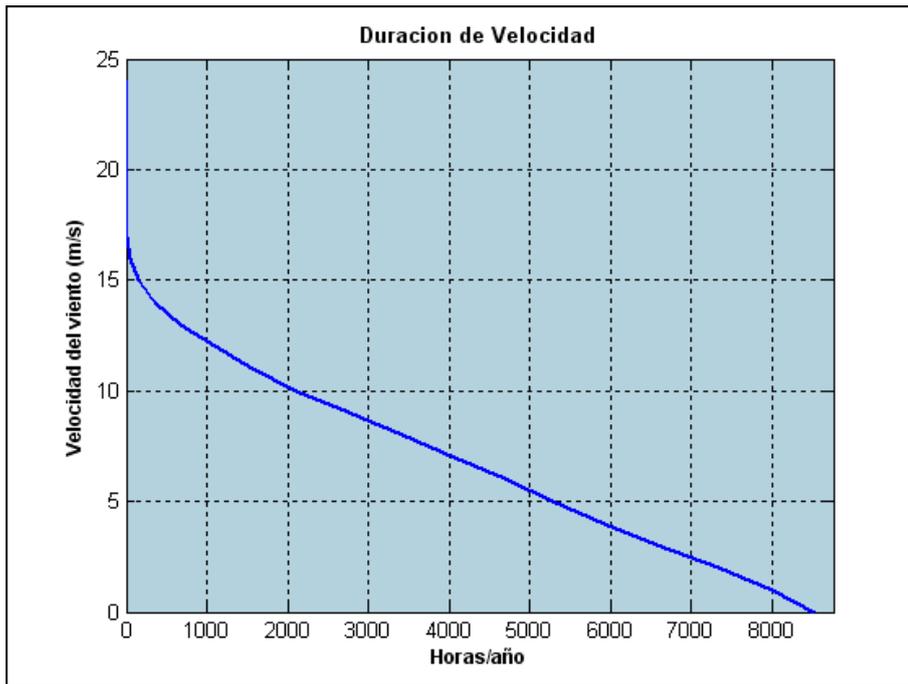


Figura 7.16: Horas de Velocidad del Viento acumuladas en un año.

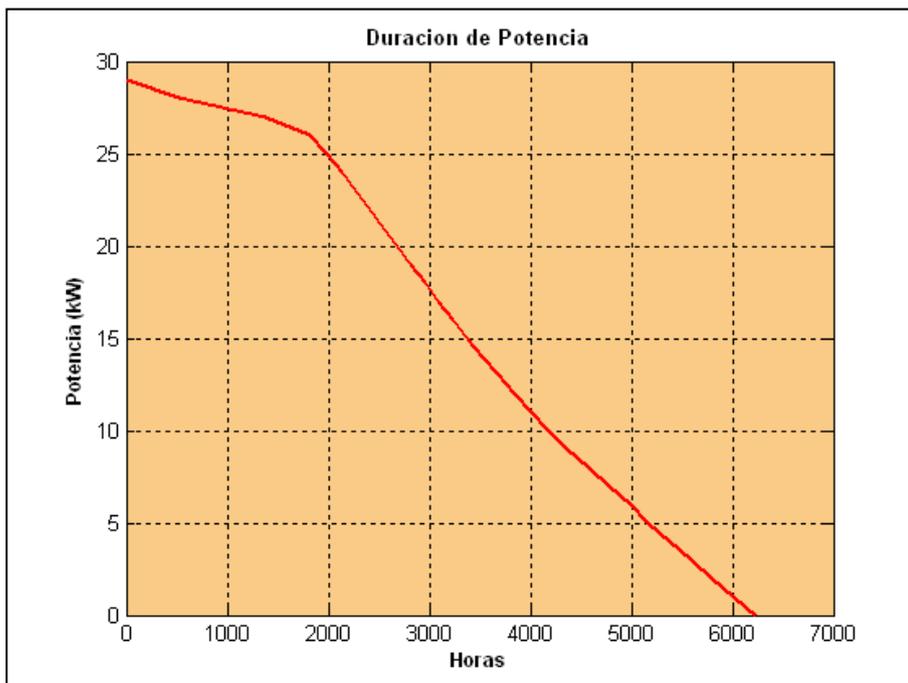


Figura 7.17: Horas de Potencia del Aerogenerador acumuladas en un año.

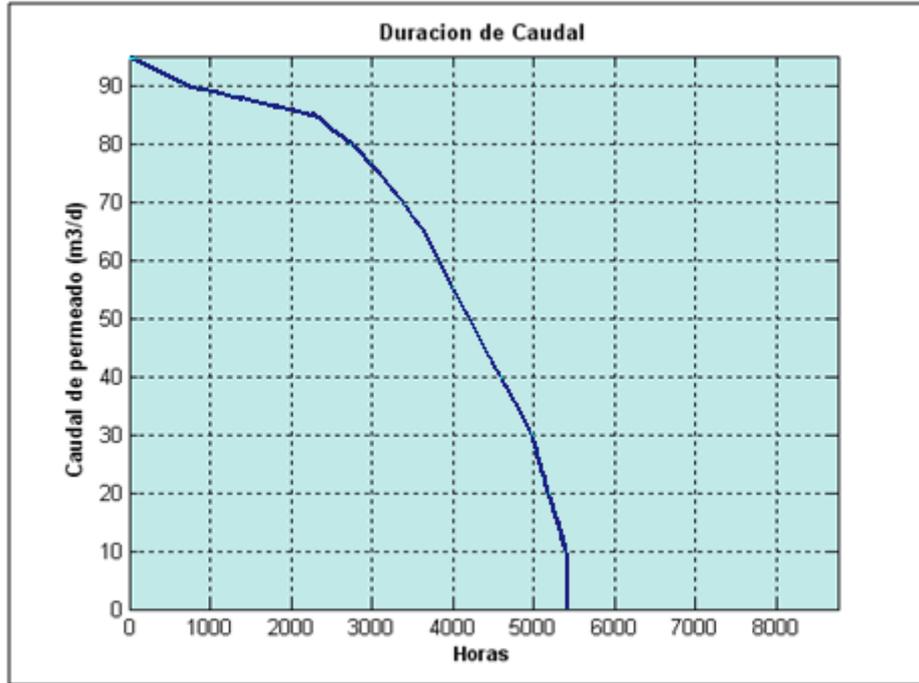


Figura 7.18: Horas de Caudal de Permeado acumuladas en un año.

Simulación del proceso energía eólica – desalación.

8.1 Consideraciones preliminares.

Las plantas de ósmosis inversa pueden tener múltiples configuraciones dependiendo del tipo de agua de alimentación, de la utilidad y de los objetivos que se pretendan cubrir con el tratamiento del agua. Teniendo en cuenta la realidad en Canarias el tipo de agua de alimentación considerado será agua de mar. Se ha elegido como base para el cálculo una configuración monoetapa típica en las plantas de ósmosis inversa para agua de mar, cuyo esquema se puede observar en la Figura 8.1.

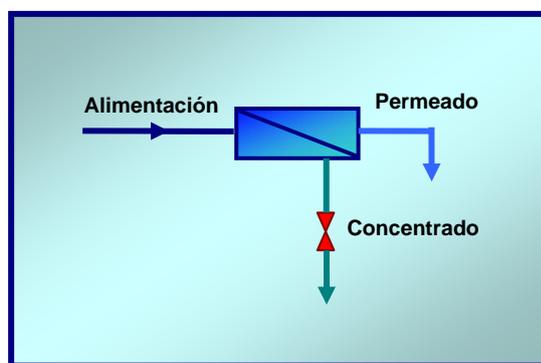


Figura 8.1: Esquema de la configuración monoetapa básica.

8.1.1 Unidades

El modelo elegido como base para el cálculo utiliza el sistema de unidades inglesas, a continuación, en la Tabla 8.1 se exponen los factores de conversión necesarios para cada magnitud.

Magnitud	Unidad Inicial	Factor	Unidad Final
Longitud	ft	0.3048	m
Presión	psi	0.069	bar
	psi	6.9	kPa
Flujo o Caudal	gfd	0.0408	m ³ /m ² /d
	gpd	0.003785	m ³ /d
	gpm	0.227	m ³ /h
		5.4480	m ³ /d
Permeabilidad	gfd/psi	0.5918	m ³ /m ² /d/ bar

Tabla 8.1: Factores de conversión de unidades.

Los cambios de unidades se han integrado en dos funciones:

Presión: $unidadp(up1, up2, P)$ donde $up1$ es la unidad de presión inicial, $up2$ es la unidad de presión final y, P es la magnitud de presión a convertir. Las unidades de presión admitidas son: psi, bar, kPa.

Caudal: $unidadq(uq1, uq2, Q)$ donde $uq1$ es la unidad de caudal inicial, $uq2$ es la unidad de caudal final y, P es la magnitud de presión a convertir. Las unidades de presión admitidas son: gpd, gph, gpm, gps, m³/d, m³/h, m³/m, m³/s.

8.1.2 Nomenclatura

Tabla 8.2 se relaciona la nomenclatura que se empleara a lo largo del procedimiento de cálculo.

Símbolo	Nombre	Unidades
N	Número de membranas en el sistema	
FPm	Factor de polarización de la membrana	
TCF	Factor corrector de la temperatura	
FF	Factor de fouling (ensuciamiento)	fracción
Y	Tasa de conversión del sistema	fracción
Ym	Tasa de conversión de la membrana i	fracción
Rm	Rechazo de sales de la membrana i	fracción
S	Superficie de la membrana	ft ²
A	Coefficiente de transporte de agua	gfd/psi

Símbolo	Nombre	Unidades
B	Coefficiente de transporte de sales	ft/s
P _{fm(i)}	Presión en la alimentación de la membrana i	psi
P _{cm(i)}	Presión en el concentrado de la membrana i	psi
P _{pm(i)}	Presión en el permeado de la membrana i	psi
ΔP _{fcm(i)}	Media de la caída de presión entre la alimentación y el concentrado de la membrana i	psi
π _f	Presión osmótica en la alimentación de la primera membrana	psi
π _{c(i)}	Presión osmótica del concentrado de la membrana i	psi
π _{p(i)}	Presión osmótica del permeado de la membrana i	psi
Q _{fm(i)}	Caudal de alimentación de la membrana i	gpd
Q _{cm(i)}	Caudal de concentrado de la membrana i	gpd
Q _{pm(i)}	Caudal de permeado de la membrana i	gpd
Q _{fcm(i)}	Media aritmética del flujo entre la alimentación y el concentrado de la membrana i	gpd
C _{fm(i)}	Concentración en la alimentación de la membrana i	mg/l
C _{cm(i)}	Concentración en el concentrado de la membrana i	mg/l
C _{pm(i)}	Concentración en el permeado de la membrana i	mg/l
C(i)	Concentración del ion i en la alimentación	mg/l
PM(i)	Peso molecular del ion i	g
Z(i)	Valencia del ion i	
TDS	Concentración de sales en la alimentación	mg/l
SMOLAR	Suma de las concentraciones molares de los iones en la alimentación	moles/l

Tabla 8.2 Nomenclatura.

8.1.3 Membranas.

Las membranas de agua de mar de FILMTEC y de KOCH, se han incluido en el programa en dos ficheros tipo '.m' con el nombre del fabricante correspondiente 'FILMTEC' y 'KOCH' respectivamente. En estos ficheros se almacenan tanto los nombres como las características de cada membrana en dos vectores: el nombre en un vector de caracteres y los parámetros característicos en un vector numérico con 17 columnas cuyo contenido se desarrolla a continuación:

1. Superficie: S (ft²)
2. Presión de ensayo: Pf0 (psi)
3. Caudal de permeado en las condiciones de ensayo: Qp0 (gpd)
4. Rechazo de sales: (%)
5. Concentración de sales en la alimentación de ensayo: TDS0 (mg/l)
6. Conversión de ensayo: Ym0 (%)
7. Temperatura de ensayo: T0(°C)
8. Factor de fouling: FF (fraccion),
9. Flujo recomendado: J (gfd)
10. Conversión máxima recomendada: Ymax (%),
11. Caudal de permeado máximo recomendado: Qpmax (gfd),
12. Caudal de concentrado mínimo recomendado: Qcmin (gfd),
13. Caudal de alimentación máximo recomendado: Qfmax (gfd),
14. Presión máxima recomendada: Pmax (psi),
15. Temperatura máxima recomendada: Tmax (°C),
16. Coeficiente de transporte de agua: An (gfd/psi),
17. Coeficiente de transporte de sales: Bn (ft/d)

Estos datos, suministrados por los fabricantes de las membranas, incluyen los parámetros característicos, las condiciones y los resultados de ensayo, los límites de operación recomendados y los coeficientes de transporte. En el ANEXO I se muestran las hojas características de las membranas incluidas en el proyecto.

8.2 Análisis del agua de alimentación.

Todos los cálculos referentes al agua de alimentación se incluyen en la función 'CAL_TDS'.

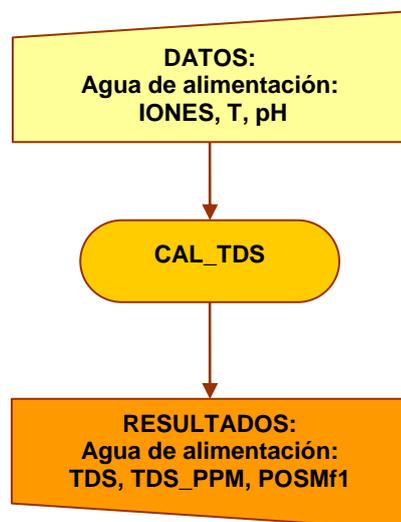


Figura 8.2: Esquema de la función 'CAL_TDS'.

8.2.1 Cálculo de la Concentración de Sales en el Caudal de Alimentación

A partir de las concentraciones introducidas se calcula la concentración de sales en el permeado (TDS) en mg/l como suma de las concentraciones de cada uno de los iones presentes en el agua de alimentación

$$TDS = \sum C_i \quad \text{[VIII.1]}$$

8.2.2 Cálculo de las Concentraciones en ppm de NaCl

Molalidad.

$$m_i = \frac{C_i}{1000PM_i \frac{10^6 - TDS}{10^6}} \quad \text{[VIII.2]}$$

Densidad del agua.

$$\rho = 1.00157 - 1.56096 \cdot 10^{-4}t - 2.69491 \cdot 10^{-6}t^2 \quad \text{[VIII.3]}$$

Fuerza iónica.

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2 \quad \text{[VIII.4]}$$

Coficiente osmótico.

$$\phi = 1 - \frac{S}{3.375I} \left(A - 2LnA - \frac{1}{A} \right) + BI' + CI'^2 \quad \text{[VIII.5]}$$

donde,

$$S = 1.17202 \left(\frac{\sum m_i Z_i^2}{\sum m_i} \right) \left[\frac{23375.556}{D(t + 273.16)} \right]^{3/2} \rho^{1/2} \quad \text{[VIII.6]}$$

$$A = 1 + 1.5I^{1/2} \quad \text{[VIII.7]}$$

$$B = 6.72817 - \frac{348.662}{t + 273.16} - 0.971207Ln(t + 273.16) \quad \text{[VIII.8]}$$

$$C = \frac{40.4016}{t + 273.16} - 0.721404 + 0.103915Ln(t + 273.16) \quad \text{[VIII.9]}$$

$$D = 233.73 + \frac{5321}{t + 273.16} - 0.9297(t + 273.16) + 0.001417(t + 273.16)^2 - 8.292 \times 10^{-7}(t + 273.16)^3 \quad \text{[VIII.10]}$$

$$I' = \frac{1}{2} \sum m_i \quad \text{[VIII.11]}$$

Presión osmótica

$$\pi = 1.2041 \phi (t + 273) \sum m_i \quad \text{[VIII.12]}$$

Concentración de sales en la alimentación expresada en ppm de NaCl (TDS_{ppm}):

$$TDS_{ppm} = \frac{1000 \pi_f}{\left[0.0385(T + 273) + \frac{\pi_f}{1000} \right]} \quad \text{[VIII.13]}$$

8.2.3 Cálculo de la Presión Osmótica

Así, utilizando las concentraciones en ppm podemos calcular la presión osmótica en cada punto como la de una solución de NaCl en agua:

$$\pi = \frac{0.0385 \cdot C_{ppm} \cdot (t + 273)}{1000 - \frac{C_{ppm}}{1000}} \quad \text{[VIII.14]}$$

Esta ecuación se ha implementado en la función 'CAL_POSM' con el fin de emplearla más cómodamente a lo largo del proceso de cálculo.

8.2.4 Cálculo de las Concentraciones en meq/l

Concentración equivalente en meq/l

$$C_{eq}(i) = \frac{C(i) \cdot Z(i)}{PM(i)} \quad meq/l \quad [VIII.15]$$

Concentración de Ca^{+2} en la alimentación en meq/l

$$C_{meq,f}(Ca^{+2}) = 0.0499 \cdot C(Ca^{+2}) \quad meq/l \quad [VIII.16]$$

Concentración de HCO_3^- en la alimentación en meq/l o Alcalinidad.

$$Alk_f = C_{meq,f}(HCO_3^-) = 0.0164 \cdot C(HCO_3^-) \quad meq/l \quad [VIII.17]$$

El factor de concentración se puede calcular de manera aproximada en función de la conversión expresada como fracción:

$$CF = \left(\frac{1}{1-Y} \right) \quad [VIII.18]$$

La concentración de iones en la corriente de concentrado se puede estimar fácilmente de la concentración en la alimentación multiplicando por el factor de concentración.

$$C_{meq,c} = CF \cdot C_{meq,f} \quad [VIII.19]$$

Concentración de Ca^{+2} en la alimentación en meq/l

$$C_{meq,c}(Ca^{+2}) = CF \cdot C_{meq,f}(Ca^{+2}) \quad meq/l \quad [VIII.20]$$

Concentración de HCO_3^- en la alimentación en meq/l o Alcalinidad.

$$Alk_c = CF \cdot Alk_f = CF \cdot C_{meq,f}(HCO_3^-) \quad meq/l \quad [VIII.21]$$

De donde podemos obtener

$$pCa = -\log[C_{meq,c}(Ca^{+2})] \quad [VIII.22]$$

$$pAlk = -\log[Alk_c] \quad [VIII.23]$$

8.2.5 Cálculo de las Concentraciones en mg/l de CaCO₃

Concentración expresada en mg/l de CaCO₃

$$C_{CaCO_3}(i) = \frac{PM(CaCO_3)}{Z(Ca)} \cdot C_{meq}(i) = 50 \cdot C_{meq}(i) \quad mg/l \text{ de } CaCO_3 \quad [VIII.24]$$

Concentración de Ca⁺² en la alimentación en mg/l de CaCO₃.

$$C_f(Ca^{+2}) = 2.4938 \cdot C(Ca^{+2}) \quad mg/l \text{ de } CaCO_3 \quad [VIII.25]$$

Concentración de HCO₃⁻ en la alimentación en mg/l de CaCO₃.

$$C_f(HCO_3^-) = 0.8197 \cdot C(HCO_3^-) \quad mg/l \text{ de } CaCO_3 \quad [VIII.26]$$

Concentración de Ca⁺² en el concentrado en mg/l de CaCO₃.

$$C_c(Ca^{+2}) = CF \cdot C_f(Ca^{+2}) \quad mg/l \text{ de } CaCO_3 \quad [VIII.27]$$

Concentración de HCO₃⁻ en el concentrado en mg/l de CaCO₃.

$$C_c(HCO_3^-) = CF \cdot C_f(HCO_3^-) \quad mg/l \text{ de } CaCO_3 \quad [VIII.28]$$

8.2.6 Cálculo de la Fuerza Iónica

Fuerza iónica en la alimentación (mmol/kg).

$$I_f = \frac{1}{2} \sum m_i Z_i^2 \quad [VIII.29]$$

Fuerza iónica en el concentrado (mmol/kg).

$$I_c = CF \cdot I_f \quad [VIII.30]$$

8.2.7 Cálculo del pH en el Concentrado

Concentración de CO₂ libre en la alimentación.

$$pH_f = 6.30 + \log \left[\frac{C_f(HCO_3^-)}{C_f(CO_2)} \right] \Rightarrow C_f(CO_2) = 10^{(6.30 - pH_f)} \cdot C_f(HCO_3^-) \quad [VIII.31]$$

Concentración de CO₂ libre en el concentrado.

$$C_c(CO_2) = C_f(CO_2) \quad [VIII.32]$$

pH en el concentrado.

$$pH_c = 6.30 + \log \left[\frac{C_c(HCO_3^-)}{C_c(CO_2)} \right] \quad [VIII.33]$$

8.2.8 Cálculo del Índice de Langelier

Constante de Langelier

$$K_L = -0.025 \cdot t + 8.9 \quad 0 \leq t \leq 25^\circ C \quad [VIII.34]$$

Factor de corrección dependiente del TDS del agua.

$$\log f_L = \frac{2.5 \cdot \sqrt{I}}{1 + 5.3 \cdot \sqrt{I} + 5.5 \cdot I} \quad [VIII.35]$$

pH de saturación para el índice de Langelier

$$pH_s = K_L + \log f_L + pCa_c + pAlk_c \quad [VIII.36]$$

Índice de saturación de Langelier.

$$LSI_c = pH_c - pH_s \quad [VIII.37]$$

8.2.9 Control de Incrustación.

Si $LSIc > 0$ añadimos H_2SO_4 . Cálculo iterativo de la cantidad de ácido. Se estima el pH después de añadir el ácido ($pH_f < 7$):

$$pH_f^a = 6.3 + \log[R_f^a] \quad [VIII.38]$$

$$R_f^a = 10^{(pH_f^a - 6.3)} = \left[\frac{C_f^a(HCO_3^-)}{C_f^a(CO_2)} \right] \quad [VIII.39]$$

Se calcula la concentración de CO_2 después de añadir el ácido

$$C_f^a(CO_2) = C_f(CO_2) + 0.88 \cdot (C_f(HCO_3^-) - C_f^a(HCO_3^-)) \quad [VIII.40]$$

$$C_f^a(HCO_3^-) = C_f(HCO_3^-) - 1.02 \cdot C(H_2SO_4) \quad [VIII.41]$$

Se calcula la concentración de HCO_3^- después de añadir el ácido

$$C_f^a(HCO_3^-) = \frac{R_f^a (C_f(CO_2) + 0.88 \cdot C_f(HCO_3^-))}{1 + 0.88 \cdot R_f^a} \quad [VIII.42]$$

$$C_f^a(CO_2) = C_f(CO_2) + 0.90 \cdot C(H_2SO_4) \quad [VIII.43]$$

Se calcula la concentración de ácido requerida

$$C(H_2SO_4) = \frac{C_f(HCO_3^-) - C_f^a(HCO_3^-)}{2} \quad [VIII.44]$$

Se calcula el nuevo índice. Si $LSIc > 0$ volvemos al 1º) con un nuevo valor de pH_f .

Para agua de mar, típicamente,

$$C(H_2SO_4) = 10 \text{ mg/l}$$

8.3 Cálculo de las variables dentro de un tubo.

8.3.1 Conocidos el Caudal y la Presión de Entrada.

Consideraciones previas:

Se introducen los datos necesarios para el cálculo:

Parámetros del agua de alimentación: T, TDS_PPM

Parámetros de diseño: fabricantes, membranas, N, FF, Qf, Pa, Pp.

Se genera una matriz MEM(N,17) con las características de todas las membranas del tubo. Si el usuario no fija otro valor, se considera una caída de presión a la entrada y a la salida del tubo de 5 psi. Por lo tanto: $P_f = P_a - 5 \text{ psi}$

El procedimiento de cálculo que se expone a continuación está implementado en la función 'CAL_TUBO':

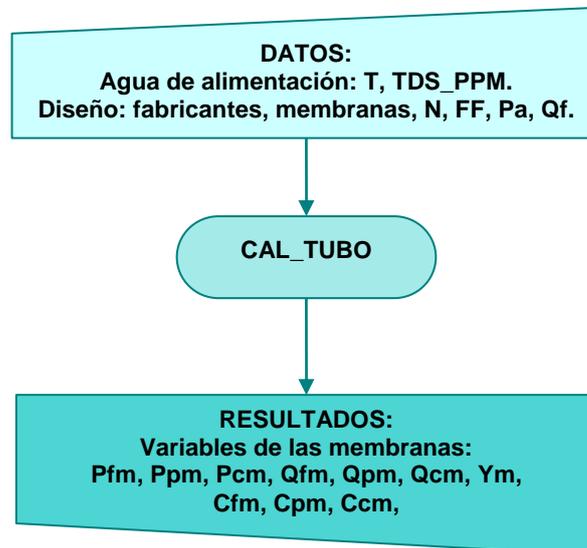


Figura 8.3: Esquema de la función 'CAL_TUBO'.

Si el usuario no introduce otro valor, se calcula el factor de fouling suponiendo un tiempo de envejecimiento de dos años:

$$FF = (7884 \cdot n)^2 \quad \text{[VIII.45]}$$

Se calcula el factor corrector de la temperatura con la función 'CAL_TCF':

Para FILMTEC

$$\begin{cases} TCF = e^{\left[3020 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right]} & T \leq 25^\circ C \\ TCF = e^{\left[2640 \cdot \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273+T}\right)\right]} & T \geq 25^\circ C \end{cases} \quad \text{[VIII.46]}$$

Para KOCH

$$TCF = e^{\left[3100 \left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{298} \right)\right]} \quad [\text{VIII.47}]$$

Se establecen las condiciones de contorno:

Para $i = 1$

$$\begin{aligned} Q_{fm}(i) &= Q_f \\ C_{fm}(i) &= TDS_ppm \\ P_{fm}(i) &= P_f \end{aligned}$$

Para $i \neq 1$

$$\begin{aligned} Q_{fm}(i) &= Q_{cm}(i-1) \\ C_{fm}(i) &= TDS_ppm \\ P_{fm}(i) &= P_{cm}(i-1) \end{aligned}$$

Para $i = i$

$$P_{pm}(i) = P_p$$

Se establecen los parámetros de las membranas

$$\begin{aligned} S(i) &= \text{MEM}(i, 1) \\ P_{f0}(i) &= \text{MEM}(i, 2) \\ Q_{p0}(i) &= \text{MEM}(i, 3) \\ R(i) &= \text{MEM}(i, 4)/100 \\ C_{f0} &= \text{MEM}(i, 5) \\ Y_{m0} &= \text{MEM}(i, 6) \\ T_0 &= \text{MEM}(i, 7) \\ A_n(i) &= \text{MEM}(i, 16) \\ B_n(i) &= \text{MEM}(i, 17) \end{aligned}$$

Se establecen las hipótesis de partida para iterar:

$$\begin{aligned} Y_m(i) &= Y_{m0} \\ C_{pm}(i) &= C_{fm}(i) \cdot (1-R(i)) \\ Q_{pm}(i) &= Q_{fm}(i) \cdot Y_m(i) \\ \text{err}Y_m &= 100 \\ Y_{m_antes} &= 0 \end{aligned}$$

Se comprueban las condiciones para iterar:

si $\text{err}Y_m > 0$ se continua con el paso siguiente, 0,
en caso contrario salta al final de la iteración, 0.

Se calcula el factor de polarización en la membrana i mediante la función 'CAL_FPM':

$$FP_m(i) = e^{(0.7 \cdot Y_m(i))} \quad [\text{VIII.48}]$$

Se calcula el caudal de concentrado de la membrana i

$$Q_{cm}(i) = Q_{fm}(i) - Q_{pm}(i) \quad [\text{VIII.49}]$$

Se calcula el caudal medio de alimentación y concentrado de la membrana i

$$Q_{fcm}(i) = \frac{Q_{fm}(i) + Q_{cm}(i)}{2} \quad [\text{VIII.50}]$$

Se calcula la caída de presión en la membrana i, mediante la función 'CAL_PFC'

$$\Delta P_{fcm}(i) = 0.01 \left(\frac{Q_{fm}(i) \cdot (2 - Y_m(i))}{2880} \right)^{1.7} \quad [\text{VIII.51}]$$

Se calcula la concentración de concentrado en la membrana i

$$C_{cm}(i) = \left(\frac{C_{fm}(i) \cdot Q_{fm}(i) - C_{pm}(i) \cdot Q_{pm}(i)}{Q_{cm}(i)} \right) \quad [\text{VIII.52}]$$

Se calcula la concentración media de alimentación y concentrado en la membrana i

$$C_{fcm}(i) = \frac{C_{fm}(i) + C_{cm}(i)}{2} \quad [\text{VIII.53}]$$

Se calcula la concentración de la capa límite en la membrana i

$$C_{bm}(i) = C_{fcm}(i) \cdot FP_m(i) \quad [\text{VIII.54}]$$

Se calculan las presiones osmóticas introduciendo las concentraciones correspondientes en la función 'CAL_POSM':

$$\pi_f(i) = \text{CAL_POSM}(C_{fm}(i))$$

$$\pi_p(i) = \text{CAL_POSM}(C_{pm}(i))$$

$$\pi_c(i) = \text{CAL_POSM}(C_{cm}(i))$$

$$\pi_b(i) = \text{CAL_POSM}(C_{bm}(i))$$

Se calcula constante de permeabilidad modificada para el agua

$$A(i) = A_n(i) \cdot \left(\frac{C_{fm}(i)}{C_{f0}(i)} \right)^{-0.09} \cdot e^{\left(7.1 \cdot \frac{T-T_0}{T_0+273} \right)} \quad [\text{VIII.55}]$$

Se calcula constante de permeabilidad modificada para las sales

$$B(i) = B_n(i) \cdot \left(\frac{C_{fm}(i)}{C_{f0}(i)} \right)^{-0.09} \cdot e^{(0.0298(T-T_0))} \quad [\text{VIII.56}]$$

Se calcula el caudal de permeado

$$Q_{pm}(i) = A(i) \cdot S \cdot TCF \cdot FF \cdot \left(P_{fm}(i) - \frac{\Delta P_{fcm}(i)}{2} - P_{pm}(i) - \pi_{fc}(i) + \pi_p(i) \right) \quad [\text{VIII.57}]$$

Se calcula la concentración de permeado

$$C_{pm}(i) = B(i) \cdot S(i) \cdot TCF \cdot \frac{C_{fcm}(i) \cdot FP_m(i)}{Q_{pm}(i)} \quad [\text{VIII.58}]$$

Se almacena los valores actuales de Ym(i) y err_Ym

$$\begin{aligned} Ym_antes &= Ym(i) \\ err_Ym_antes &= err_Ym \end{aligned}$$

Se calcula el nuevo valor de Ym(i)

$$Y_m(i) = \frac{Q_{pm}(i)}{Q_{fm}(i)} \quad [\text{VIII.59}]$$

Se calcula el error

$$err_Ym = \frac{|Y_m(i) - Ym_antes|}{Y_m(i)} \cdot 100 \quad [\text{VIII.60}]$$

Se fija el nuevo valor para iterar

$$Y_m(i) = \frac{Y_m(i) + Ym_antes}{2} \quad [\text{VIII.61}]$$

Si el error es mayor o igual que en la iteración anterior se trunca el proceso iterativo:

$$err_Ym \geq err_Ym_antes \Rightarrow \begin{cases} Y_m(i) = Ym_antes \\ err_Ym = 0 \end{cases}$$

Se regresa al paso 0

Se calcula la presión en el concentrado. Para ello, con el valor definitivo de se calcula con el valor definitivo de $Y_m(i)$, se calcula nuevamente $Q_{cm}(i)$ mediante la ecuación [VIII.49], este valor se introduce en la ecuación [VIII.50] para obtener $Q_{fcm}(i)$, y éste, a su vez, en la ecuación [VIII.51] para determinar $\Delta P_{fcm}(i)$. De esta manera, se puede calcular la presión en el concentrado restando esta caída de presión a la presión de alimentación:

$$P_{cm}(i) = P_{fm}(i) - \Delta P_{fcm}(i) \quad [VIII.62]$$

Se comprueba si los resultados de las variables calculadas han superado alguno de los límites de operación recomendados por el fabricante de la membrana i . Estos límites están implementados en la función 'limites' cuyos resultados se almacenan en el vector 'vlim_tubo'.

Se almacenas las variables de las membranas: P_{fm} , P_{pm} , P_{cm} , Q_{fm} , Q_{pm} , Q_{cm} , Y_m , C_{fm} , C_{pm} , C_{cm} .

8.3.2 Conocidos el Caudal de Entrada y la Conversión.

Consideraciones previas:

Se introducen los datos necesarios para el cálculo:

Parámetros del agua de alimentación: T , TDS_PPM

Parámetros de diseño: fabricantes, membranas, N , FF , Q_f o Q_p , Y , P_p .

Se genera una matriz $MEM(N,17)$ con las características de todas las membranas del tubo.

Si Q_p es dato: $Q_f = Q_p/Y$

Si Q_f es dato: $Q_p = Q_f \cdot Y$

El procedimiento de cálculo está implementado en la función 'CAL_TUBO_Y':

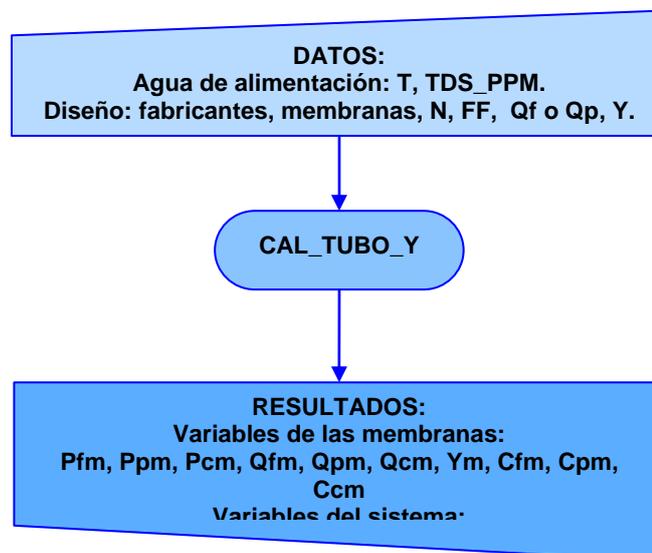


Figura 8.4: Esquema de la función 'CAL_TUBO_Y'.

Se fijan las hipótesis de partida para iterar. Se considerará como valor inicial de la presión, la presión de ensayo de la membrana 1 del tubo:

$$\begin{aligned} P_f &= P_{f0} = \text{MEM}(1,2) \\ \text{errY} &= 100 \\ \text{errY_antes} &= 100 \end{aligned}$$

Se comprueba la condición para iterar:

Si $\text{errY} > 0.5$ continuamos con el paso 0

En caso contrario salimos del proceso iterativo, paso 0

Se almacena el valor de iteración de P_f en P_{f_antes} :

$$P_{f_antes} = P_f$$

Se introducen los datos en la función 'CAL_TUBO' para calcular las variables de las membranas, incluida la conversión.

Se calcula la conversión del sistema, Y_2 , para los valores de la iteración:

$$Y_2 = 1 - \prod_1^n (1 - Y_m(i)) \quad [\text{VIII.63}]$$

Se almacena el valor del error anterior en errY_antes

$$\text{errY_antes} = \text{errY}$$

Se calcula el nuevo error:

$$\text{errY} = \frac{|Y - Y_2|}{Y} \cdot 100 \quad [\text{VIII.64}]$$

Se establece el valor de P_f para la siguiente iteración en función del valor de la conversión del sistema calculada:

$$\text{Si } Y_2 < Y \quad P_f = P_f + 1$$

$$\text{Si } Y_2 > Y \quad P_f = P_f - 1$$

$$\text{En otro caso} \quad P_f = P_f$$

Si el error es mayor o igual que en la iteración anterior truncamos el proceso iterativo:

$$\text{errY} \geq \text{errY_antes} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} P_f(i) = P_{f_antes} \\ \text{errY} = 0 \end{cases}$$

Se regresa al paso 0

Se almacenan las variables:

De las membranas: P_{fm} , P_{pm} , P_{cm} , Q_{fm} , Q_{pm} , Q_{cm} , Y_m , C_{fm} , C_{pm} , C_{cm} .

Del sistema: Pf, Qf o Qp, Y.

8.3.3 Cálculo del Rango de Operación del Sistema.

Consideraciones previas:

Se introducen los datos necesarios para el cálculo:

Parámetros del agua de alimentación: T, TDS_PPM

Parámetros de diseño: fabricantes, membranas, N, FF, Pp.

Se genera una matriz MEM(N,17) con las características de todas las membranas del tubo.

Se introducen los datos del motor: η_{motor} (%)

Se introducen los datos de la bomba: η_{bomba} (%)

Límites de operación: lim_bomba, Pb_min, Pb_max, Qb_min, Qb_max

Se introduce el sistema de recuperación:

Ninguno: ninguno

Turbina: turbina

Intercambiador de presión: int_presion, booster, mixing, Qr_min, Qr_max

Se introduce la concentración de sales en el permeado máxima: Cp_max

Se introducen límites especiales para las membranas:

lim_mem, Pf_min, Pf_max, Qf_min, Qf_max, Qp_min, Qp_max, Qc_min, Qc_max.

Se cuantifican las perdidas a la entrada y al salida del tubo: perd_ent, perd_sal.

Se eligen los valores más restrictivos para los limites de caudal y presión de alimentación:

P_min, P_max, Q_min y Q_max.

Se introducen los intervalos de los vectores de barrido de presión y caudal.

El procedimiento de cálculo está implementado en la función 'CAL_RANGO':

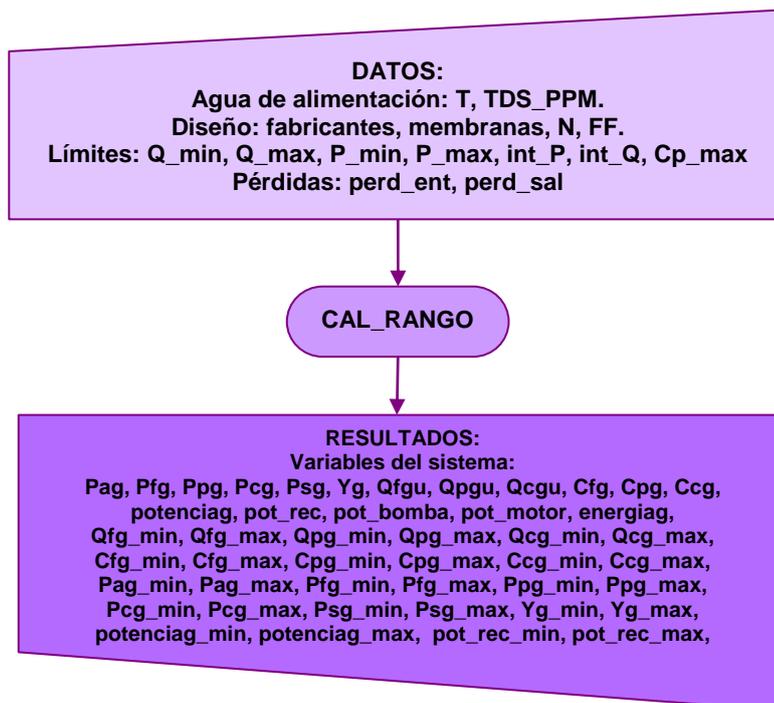


Figura 8.5: Esquema de la función 'CAL_RANGO'.

Se cambian las unidades del usuario de presión y caudal de los límites establecidos a las unidades de cálculo.

Se introducen los límites del rango de operación característicos del sistema:

El sistema necesitará una presión de entrada suficiente para vencer como mínimo la presión osmótica del agua de alimentación:

$$P_{\text{minc}} = \text{POSMf1}$$

La presión de entrada nunca podrá ser mayor que la menor presión máxima que soportan las membranas del tubo:

$$P_{\text{maxc}} = \min(\text{MEM}(:,14))$$

El caudal de alimentación no podrá ser inferior al caudal de concentrado mínimo de la última membrana del tubo.

$$Q_{\text{minc}} = \text{MEM}(N,12)$$

El caudal de alimentación tendrá que ser inferior que el máximo que soporta la primera membrana del tubo:

$$Q_{\text{maxc}} = \text{MEM}(1,13)$$

Se eligen los límites más restrictivos entre los fijados por el usuario y los característicos del sistema: P_{min} , P_{max} , Q_{min} , Q_{max} . Para definir el rango de variación de presión y caudal de alimentación y, por consiguiente, los vectores de barrido de presión y caudal.

Se inicializan a cero las matrices de las variables a calcular.

Se inicia un bucle de cálculo para cada valor (p) del vector de la presión de entrada (vP_{fg}).

Se fija el valor de la presión de entrada:

$$P_a = vP_{\text{fg}}(p)$$

Se calcula la presión de alimentación restándole las pérdidas a la entrada:

$$P_f = P_a - \text{perd_entc}$$

Se inicia un bucle de cálculo para cada valor (q) del vector del caudal de alimentación (vQ_{fg}).

Se fija el valor del caudal de alimentación:

$$Q_f = vQ_{\text{fg}}(q)$$

El vector 'vlimites' donde se almacena si se ha superado alguno de los límites de operación de las membranas, se inicia vacío.

Se introducen los datos en la función 'CAL_TUBO' para obtener las variables de cada membrana del tubo.

Se calculan las variables del sistema:

$$Q_p = \sum_1^N Q_{pm}(i) \quad [\text{VIII.65}]$$

$$Q_p = \frac{\sum_1^N Q_{pm}(i) \cdot C_{pm}(i)}{Q_p} \quad [\text{VIII.66}]$$

$$Q_c = Q_{cm}(N) \quad [\text{VIII.67}]$$

$$C_c = C_{cm}(N) \quad \text{[VIII.68]}$$

$$P_c = P_{cm}(N) \quad \text{[VIII.69]}$$

$$P_s = P_c - \text{perd}_{salc} \quad \text{[VIII.70]}$$

$$Y = 1 - \prod_1^N (1 - Y_m(i)) \quad \text{[VIII.71]}$$

Se comprueba si se ha superado el límite de concentración de sales ($C_p > C_{p_max}$) y si es así se incorpora el límite correspondiente al vector 'vlimites'.

Si se ha incluido un intercambiador de presión ($\text{int_presion} = 1$) se comprueba si el caudal de concentrado se encuentra dentro de los límites de operación del mismo ($Q_{r_minc} < Q_c < Q_{r_max}$), en caso contrario se incorpora el límite correspondiente al vector 'vlimites'.

Se comprueba si se ha superado alguno de los límites establecidos:

Si no se ha superado ninguno de los límites establecidos, esto es, todos los valores del vector 'vlimites' son nulos, se continua en el paso 0

Si se ha superado alguno de los límites de operación establecidos, esto es, alguno de los valores del vector 'vlimites' es la unidad, se continua en el paso 0

Se almacenan las variables del sistema calculadas en la matriz de resultados correspondiente en la fila 'p' correspondiente al valor de presión de entrada y columna 'q' correspondiente al valor de caudal de alimentación.

Se calcula la potencia que necesita el modulo de membranas para funcionar con los valores de presión de entrada y caudal de alimentación fijados:

$$\text{Potenciag}(p, q) = (P_a(\text{kPa}) - P_p(\text{kPa})) \cdot Q_f(\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{[VIII.72]}$$

Se calcula la potencia recuperada, la potencia de la bomba y la potencia del motor, en función del sistema de recuperación incorporado:

Si no existe, esto es, ninguno = 1:

$$\text{Pot}_{rec}(p, q) = 0 \quad \text{[VIII.73]}$$

$$\text{Pot}_{bomba}(p, q) = \frac{\text{Potenciag}(p, q)}{\eta_{bomba}/100} \quad \text{[VIII.74]}$$

$$\text{Pot}_{motor}(p, q) = \frac{\text{Pot}_{bomba}(p, q)}{\eta_{motor}/100} - \text{Pot}_{rec}(p, q) \quad \text{[VIII.75]}$$

Si es una turbina, turbina = 1:

$$Pot_{rec}(p, q) = P_s(kPa) \cdot Q_c(m^3/s) \cdot \frac{\eta_{rec}}{100} \quad [VIII.76]$$

$$Pot_{bomba}(p, q) = \frac{Potenciag(p, q)}{\eta_{bomba}/100} \quad [VIII.77]$$

$$Pot_{motor}(p, q) = \frac{Pot_{bomba}(p, q)}{\eta_{motor}/100} - Pot_{rec}(p, q) \quad [VIII.78]$$

Si es un intercambiador de presión, int_presion = 1:

$$Pot_{rec}(p, q) = P_s(kPa) \cdot Q_c(m^3/s) \cdot \frac{\eta_{rec}}{100} \quad [VIII.79]$$

$$Pot_{booster}(p, q) = \frac{booster}{100} \cdot Pot_{rec}(p, q) \quad [VIII.80]$$

$$Pot_{bomba}(p, q) = \frac{Potenciag(p, q)}{\eta_{bomba}/100} - Pot_{rec}(p, q) \quad [VIII.81]$$

$$Pot_{motor}(p, q) = \frac{Pot_{bomba}(p, q) + Pot_{booster}(p, q)}{\eta_{motor}/100} \quad [VIII.82]$$

Se almacenan valores nulos para las variables del sistema, incluyendo las potencias, en la matriz de resultados correspondiente en la fila 'p' correspondiente al valor de presión de entrada y columna 'q' correspondiente al valor de caudal de alimentación.

Se vuelve al paso 0 con el siguiente valor del vector de barrido del caudal de alimentación hasta el final del vector.

Se convierten las unidades de presión y caudal de las variables calculadas a las unidades del usuario y se almacenan en las matrices de resultados denominadas con el subíndice u.

Se calcula la energía específica. Para ello, se define la unidad de energía ('kWh/m3', 'kWh/kgal') en función de la unidad de caudal del usuario y las unidades de caudal (Qp_e) para el cálculo de la energía específica ('m3/h', 'gph'). Así:

$$energiag = \frac{pot_motor}{Qp_e} \quad [VIII.83]$$

Se obtienen los valores mínimos y máximos del rango de operación para cada una de las variables del sistema calculadas.

Se almacenan los resultados.

8.4 Análisis de los datos de viento.

8.4.1 Corrección de la Densidad del Aire

Consideraciones preliminares:

Se introducen los datos necesario para corregir la densidad del aire: la altura a la cual se quiere calcular la densidad y la temperatura del aire.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'cal_den_aire', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.7:

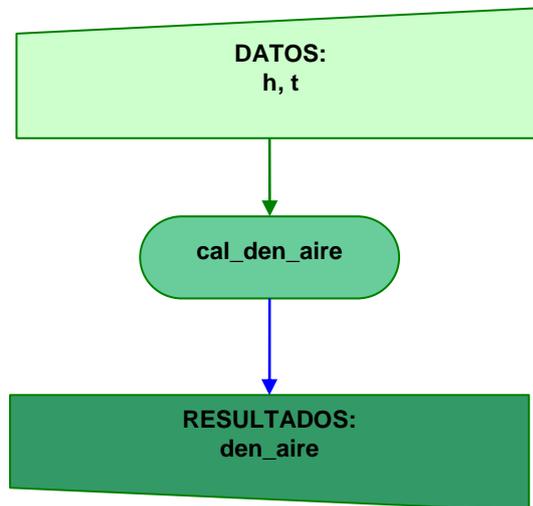


Figura 8.6: Esquema básico de la función 'cal_den_aire'.

Se pasan los datos como argumentos a la función:

h = altura (m)

t = temperatura (°C)

Se calcula la densidad del aire corregida mediante la ecuación:

$$\eta_{aire} = 1013.25 \cdot 10^2 \left(1 - 2.2569 \cdot 10^{-5} h \right)^{\frac{5.2561}{287.04(t+273)}}$$

[VIII.84]

Se pasa el resultado como argumentos a la función:

den_aire = η_{aire} (kg/m³)

8.4.2 Corrección de la Velocidad del Viento con la Altura

Consideraciones preliminares:

- Se introducen la matriz con los datos del viento, en la primera columna contiene los valores de velocidad y en la segunda los valores de dirección.
- Se introducen los parámetros del perfil de viento:
 - Tipo de perfil: logarítmico (logaritmico=1) o potencial (logaritmico=0).
 - Longitud de rugosidad: rugosidad_z0 y rugosidad_a
 - altura_medida
 - altura_corr = altura_rotor + altitud

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'altura_velocidad', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.7:

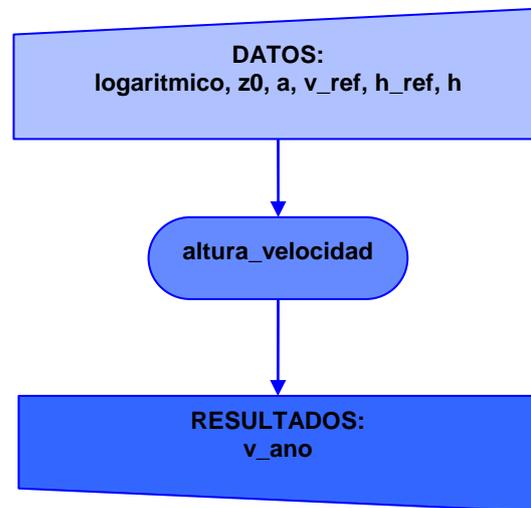


Figura 8.7: Esquema básico de la función 'altura_velocidad'.

Se pasan los datos como argumentos a la función:

logaritmico

z0 = rugosidad_z0

a = rugosidad_a

v_ref = v_ano

h_ref = altura_medida

h = altura_corr

Se calcula la velocidad corregida según el modelo elegido:

Si logaritmico = 1 ⇒ modelo logarítmico:

$$v = v_{ref} \cdot \frac{\log\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\log\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad \text{[VIII.85]}$$

Si logaritmico = 0 ⇒ modelo potencial:

$$v = v_{ref} \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^a \quad \text{[VIII.86]}$$

8.4.3 Análisis de los Datos de Velocidad

Consideraciones preliminares:

- Se introduce el vector con los datos de la velocidad del viento a lo largo del año: valores de la media o valores corregidos según la altura dependiendo de la opción seleccionada por el usuario.
- Se definen las clases de velocidad: 25 clases de 1m/s desde 0 a 25 m/s que se almacenan en el vector 'v_clases'.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función ' analisis_viento', cuyo esquema se encuentra en la figura 8.8:

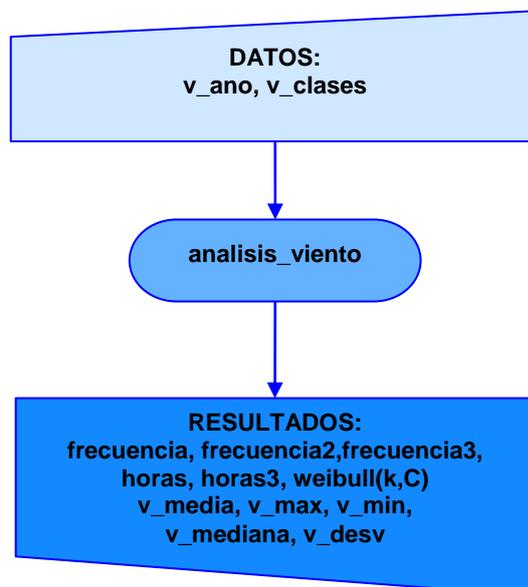


Figura 8.8: Esquema básico de la función ' analisis_viento'.

Se comprueba el valor de la variable ' corregir_altura'

Si ' corregir_altura = 1' ⇒ `v_ano = viento_corregido(:,1)'`

Si ' corregir_altura = 0' ⇒ `v_ano = viento(:,1)'`

Se calculan los variables estadísticas de la distribución: media (v_media), desviación (v_desv), mediana (v_mediana), máximo (v_max) y mínimo (v_min).

Se calcula la frecuencia relativa (frecuencia) y las horas (horas) en las que la velocidad de viento se mantiene dentro de cada clase utilizando la función implementada en Matlab 'hist'.

Se calcula la frecuencia acumulada (frecuencia2), la duración relativa (frecuencia3) y duración en horas (horas3) en las que la velocidad de viento se mantiene dentro de cada clase.

Se ajusta la distribución real a la distribución de probabilidad de Weibull, mediante la función 'weibfit' implementada en el código de MATLAB, que determina la función 'weibull(a,b)'.

Se calculan los parámetros que definen la distribución de probabilidad 'weibull(k,C)': el factor de forma (k) y el de escala (C) a partir de a y b:

Factor de forma $k = b$

$$c = \frac{1}{\sqrt[k]{a}}$$

Factor de escala

Se representan y se almacenan los resultados.

8.4.4. Análisis de los Datos de Dirección

Consideraciones preliminares:

- o Se introducen la matriz con los datos del viento, en la primera columna contiene los valores de velocidad y en la segunda los valores de dirección.
- o Se definen los 16 rumbos de la rosa de los vientos: N, NNE, NE, NEN, E, ESE, SE, SSE, S, SSO, SO, OSO, O, ONO, NO, NNO.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'análisis_dirección', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.9:

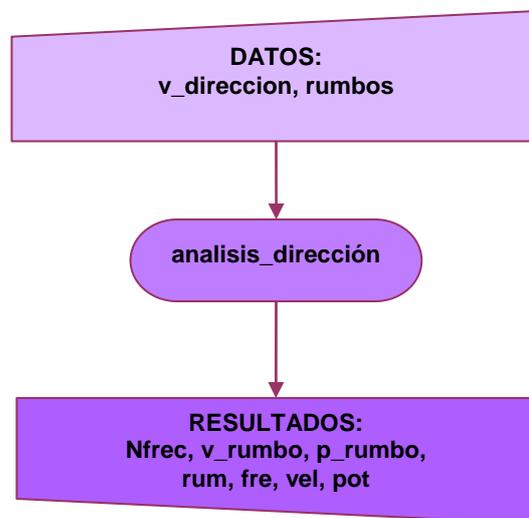


Figura 8.9: Esquema básico de la función 'análisis_dirección'.

Se calcula la frecuencia relativa para cada rumbo definido (Nfrec) utilizando la función implementada en Matlab 'hist'

Se calcula la velocidad media correspondiente a cada rumbo (v_rumbo).

Se calcula la potencia media correspondiente a cada rumbo (p_rumbo).

Se obtienen los rumbos predominantes (rum), sus frecuencias relativas (fre) así como las velocidades (vel) y potencias (pot).

Se definen los vectores necesarios para representar la rosa de los vientos: frecuencia, velocidad y potencia en valores porcentuales.

Se representan y se almacenan los resultados.

8.4.5 Curva de Potencia del Aerogenerador

Consideraciones preliminares:

- Se elige el aerogenerador que se desea utilizar:
 - el modelo se almacena en el vector de caracteres 'NOM_AERO',
 - las características se almacenan en el vector numérico 'AERO'.
 - si se dispone de la curva de potencia característica suministrada por el fabricante, se almacena en la matriz 'vel_pot', en caso contrario 'vel_pot = 0'.
- Se introduce la altitud a la que se va a instalar el aerogenerador (altitud)
- Se introduce la temperatura del aire (t_aire)
- Se elige si se desea corregir la densidad del aire (corregir_densidad)

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'potencia_aero', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.10:

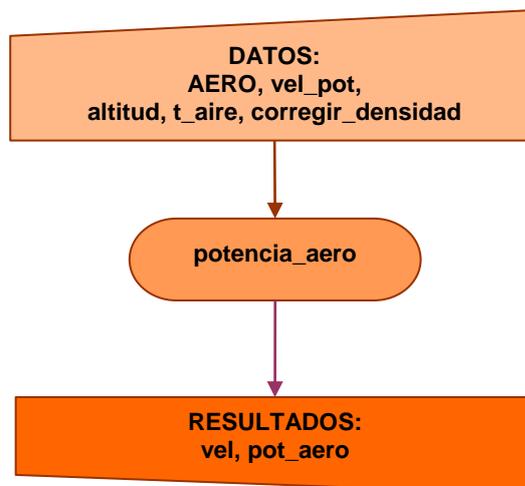


Figura 8.10 Esquema básico de la función 'potencia_aero'.

Se introducen las características del aerogenerador almacenadas en el vector 'AERO':

AERO(1) = potencia_nominal (kW),

AERO(2) = v_nominal(m/s),

AERO(3) = v_conexion(m/s),

AERO(4) = v_corte(m/s),

AERO(5) = diametro_rotor(m),

AERO(6) = altura_rotor(m)

Se calcula la altura de corrección:

$$altura_{cor} = altitud + altura_rotor$$

Se calcula la densidad del aire

Si corregir_densidad = 0

$$\rho_{aire} = \rho_{aire,st} = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

Si corregir_densidad = 1

$$\rho_{aire} = cal_den_aire(t_{aire}, altura_{cor})$$

Se calcula el área del rotor

$$A_{rotor} = \frac{\pi}{4} diametro_{rotor}^2 \quad [VIII.87]$$

Se calcula el coeficiente de potencia del aerogenerador

$$CP = \frac{Potencia_{nominal}}{\frac{1}{2} \rho_{aire,st} \cdot A_{rotor} \cdot v_{nominal}^3} \quad [VIII.88]$$

Se define el vector velocidad

Si vel_pot = 0

v = vector de 0 a 25 m/s a intervalos de 1m/s.

En caso contrario

$$v = vel_pot(1,:)$$

Se calcula la potencia del aerogenerador

Si vel_pot = 0

$$\left\{ \begin{array}{ll} Pot_{aero} = 0 & v < v_{conexión} \\ Pot_{aero} = \frac{1}{2} \cdot CP \cdot \rho_{aire} \cdot A_{rotor} \cdot v^3 & v_{conexión} \leq v \leq v_{nominal} \\ Pot_{aero} = Potencia_{nominal} & v_{nominal} < v \leq v_{corte} \\ Pot_{aero} = 0 & v_{conexión} < v \end{array} \right. \quad [VIII.89]$$

En caso contrario

Potaero = vel_pot(2,:)

Se representan y se almacenan los resultados.

8.4.6 Densidad de Potencia

Consideraciones preliminares:

Se ha calculado previamente la función de distribución de viento y se ha almacenado en la variable 'funcion_dist'.

Se ha calculado previamente la curva de potencia del aerogenerador y se ha almacenado en la variable 'pot_aero'.

Se ha calculado previamente el área del rotor, 'A_rotor'.

Se ha calculado previamente la densidad del aire, 'den_aire'.

Se ha definido previamente el vector velocidad 'v'.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'den_potencia', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.11:

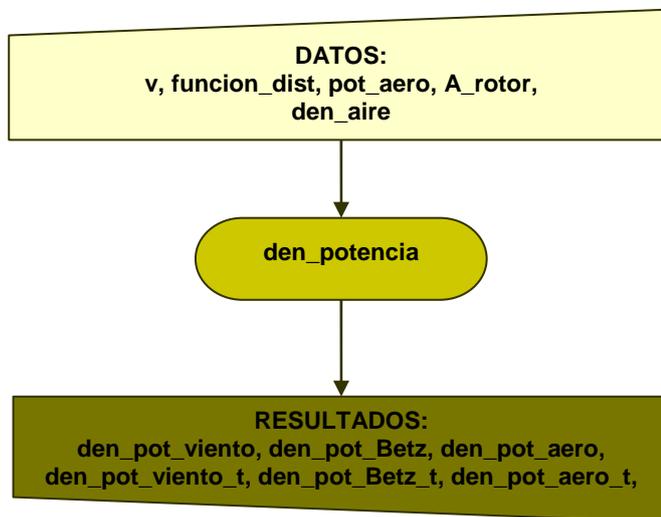


Figura 8.11 Esquema básico de la función 'den_potencia'.

Se introducen las variables necesarias: v, funcion_dist, pot_aero, A_rotor, den_aire

Se calcula la densidad de potencia contenida en el viento:

$$den_pot_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot v^3 \cdot funcion_dist \quad [VIII.90]$$

Se calcula el límite de Betz de densidad de potencia::

$$den_pot_{Betz} = \frac{16}{27} \cdot den_pot_{viento} \quad [VIII.91]$$

Se calcula la densidad de potencia producida por el aerogenerador:

$$den_pot_{Betz} = \frac{Pot_{aero} \cdot 1000}{A_{rotor}} \cdot funcion_dist \quad [VIII.92]$$

Se calculan los valore totales de densidad de potencia:

den_potviento,t, den_potBetz,t, den_potaero,t.

Se representan y se almacenan los resultados

8.4.7 Distribución Anual de Potencia

Consideraciones preliminares:

Se ha introducido previamente los datos de velocidad del viento en el vector 'v_ano'.

Se ha calculado previamente la densidad del aire, 'den_aire'.

Se ha calculado previamente el área del rotor, 'A_rotor'.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'cal_pot_ano', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.12:



Figura 8.12 Esquema básico de la función 'cal_pot_ano'.

Se introducen las variables necesarias: v_ano, corregir_densidad, den_aire, den_aire_st, potencia_nominal, v_conexion, v_nominal, v_corte, A_rotor.

Se calcula el coeficiente de potencia (CP) según la ecuación [VIII.88].

Se calcula la potencia producida a lo largo del año por el aerogenerador (pot_aero_ano) introduciendo el vector velocidad a lo largo del año (v_ano) en la ecuación [VIII.89].

Se definen las clases de potencia (p_clases) como un vector desde 0 hasta la potencia nominal del aerogenerador a intervalos de 1kW.

Se calcula la frecuencia de cada clase (fre_pot) y las horas acumuladas para cada clase a lo largo del año (horas_pot3).

Se calcula la potencia máxima (potencia_maxima), la potencia mínima (potencia_mínima) y la potencia media (potencia_media).

Se representan y se almacenan los resultados.

8.5 Régimen variable.

8.5.1 Relación entre Velocidad, Potencia y Caudal.

Consideraciones preliminares:

Se han calculado previamente los parámetros de la distribución de probabilidad de weibull de la velocidad del viento: factor_forma, escala.

Se ha calculado previamente la curva de potencia del aerogenerador y se ha almacenado en el vector 'pot_aero'.

Se ha definido previamente el vector de velocidades v.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'vel_pot_cau', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.13:

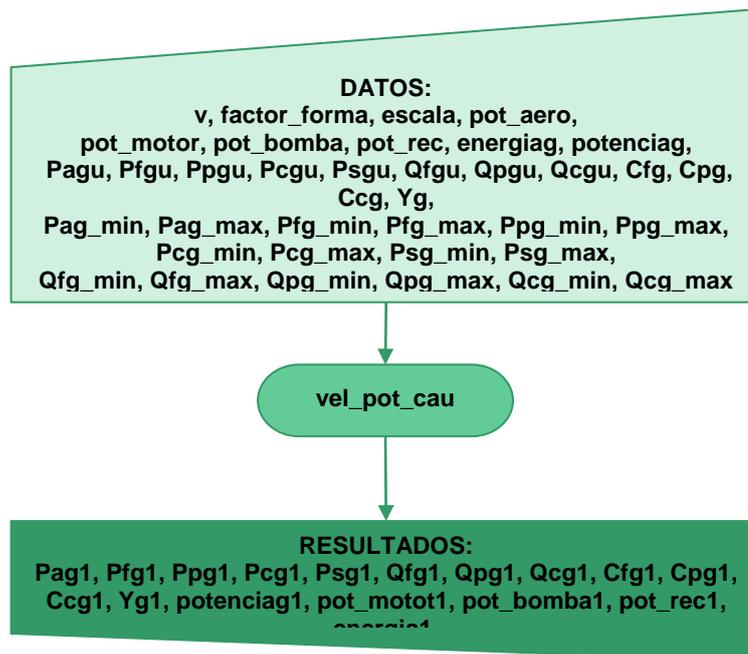


Figura 8.13: Esquema básico de la función 'vel_pot_cau'.

Se introducen las variables necesarias: v, factor_forma, escala, pot_aero, pot_motor, pot_bomba, pot_rec, energiag, potenciag, Pagu, Pfgu, Ppgu, Pcgu, Psgu, Qfgu, Qpgu, Qcgu, Cfg, Cpg, Ccg, Yg, Pag_min, Pag_max, Pfg_min, Pfg_max, Ppg_min, Ppg_max, Pcg_min, Pcg_max, Psg_min, Psg_max, Qfg_min, Qfg_max, Qpg_min, Qpg_max, Qcg_min, Qcg_max, Cfg_min, Cfg_max, Cpg_min, Cpg_max, Ccg_min, Ccg_max.

Para cada valor de potencia suministrada por el aerogenerador menor que la potencia que necesita el motor para hacer funcionar la planta de ósmosis se almacenan valores nulos para todas las variables.

Para cada valor de potencia suministrado por el aerogenerador mayor que la potencia del motor, se obtiene el valor de caudal de permeado máximo que se puede producir con esa potencia y los valores correspondientes de las demás variables.

Se representan y se almacenan los resultados.

8.5.2 Distribución Anual de Caudal

Consideraciones preliminares:

Se ha calculado previamente la distribución de potencia anual y se han almacenado en el vector 'pot_aero_ano'.

Se ha calculado previamente el rango de funcionamiento de la planta de ósmosis y se han almacenado las matrices de las variables correspondientes: presiones, caudales, concentraciones, conversión, potencias y energía específica; así como los valores máximos y mínimos para cada una de las variables.

Los cálculos que se exponen a continuación están agrupados en la función 'cal_cau_ano', cuyo esquema se encuentra en la Figura 8.14:

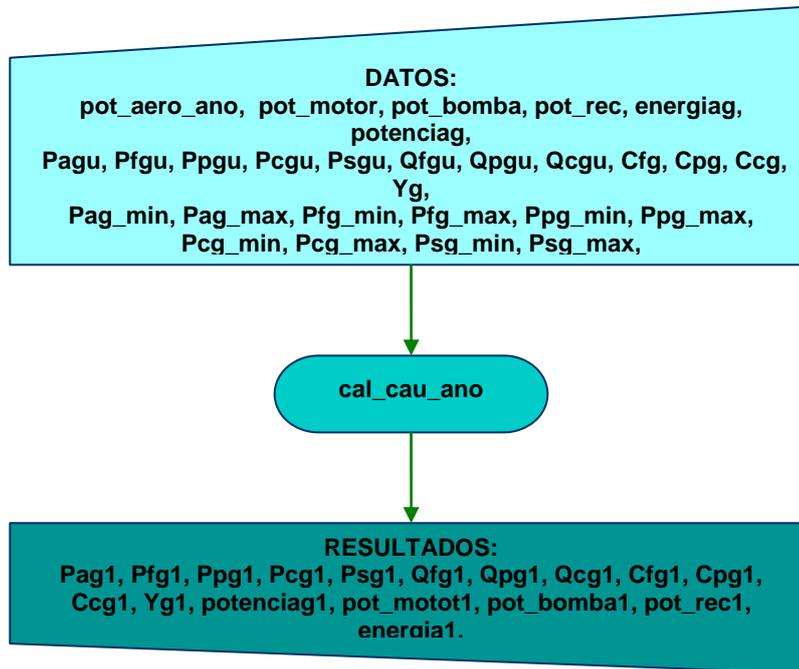


Figura 8.14: Esquema básico de la función 'cal_cau_ano'.

Se introducen las variables necesarias: pot_aero_ano, pot_motor, pot_bomba, pot_rec, energiag, potenciag, Pagu, Pfgu, Ppgu, Pcgu, Psgu, Qfgu, Qpgu, Qcgu, Cfg, Cpg, Ccg, Yg, Pag_min, Pag_max, Pfg_min, Pfg_max, Ppg_min, Ppg_max, Pcg_min, Pcg_max, Psg_min, Psg_max, Qfg_min, Qfg_max, Qpg_min, Qpg_max, Qcg_min, Qcg_max, Cfg_min, Cfg_max, Cpg_min, Cpg_max, Ccg_min, Ccg_max.

Para cada valor de potencia suministrada por el aerogenerador menor que la potencia que necesita el motor para hacer funcionar la planta de ósmosis se almacenan valores nulos para todas las variables.

Para cada valor de potencia suministrado por el aerogenerador mayor que la potencia del motor, se obtiene el valor de caudal de permeado máximo que se puede producir con esa potencia y los valores correspondientes de las demás variables.

Se calculan los valores máximo (Q_{pg1_max}), medio (Q_{pg1_medio}) y mínimo (Q_{pg1_min}) del caudal de permeado.

Se definen las clases de caudal (q_clases) como un vector desde 0 hasta el caudal máximo de permeado producido a intervalos de 10.

Se calcula la frecuencia de cada clase ($frecuenciaq$) y las horas acumuladas para cada clase a lo largo del año ($horasq3$).

Se representan y se almacenan los resultados.

8.6 Programa de simulación: Caso práctico.

8.6.1 Descripción del Programa

El programa denominado Simulación de Plantas de Ósmosis Inversa (SIPLOI) ha sido desarrollado con el objetivo de simular el comportamiento de una planta de ósmosis inversa con suministro de potencia variable.

Entorno:	Matlab versión 6.5
Nombre:	SIPLOI
Versión:	BETA
Objetivo:	Simular el comportamiento de una planta de ósmosis inversa con suministro de potencia variable.

Tabla 8.3 Datos programa simulación

En líneas generales, a partir de una serie de datos que debe introducir el usuario, esto es, características del agua de alimentación, configuración de la planta, parámetros de diseño, datos de velocidad del viento, parámetros del terreno, se obtienen los siguientes resultados: punto de funcionamiento, rango de operación, distribución de velocidad del viento, de potencia y de caudal en régimen variable. Estos cálculos están distribuidos en diferentes bloques que se desarrollan a continuación:

Agua de Alimentación:

Cálculo de la concentración total de sales, coeficiente osmótico y presión osmótica del agua de alimentación introducida.

Cálculo el índice de saturación y definición del control de incrustación.

Curva de Potencia:

Análisis de velocidad y dirección de los datos de viento introducidos: distribución de velocidad, rosa de los vientos, ajuste de Weibull, potencial eólico.

Cálculo de la distribución de potencia a partir de la curva de potencia del aerogenerador y de la distribución de viento.

Configuración de la Planta:

Basándose en una configuración simple monoetapa con un solo tubo, introducir el número de membranas por tubo y el tipo de membranas. (membranas de agua de mar de FILMTEC y KOCH).

Resultados:

Calcular el punto de funcionamiento: conversión, presiones, caudales y concentraciones para cada membrana; en base a los parámetros de diseño introducidos por el usuario: configuración de la planta, membranas, caudal de permeado, conversión.

Acotar el rango de operación de la planta: conversión, presiones, caudales, concentraciones, potencias y energía específica; para los parámetros de diseño introducidos por el usuario: configuración de la planta.

Régimen variable:

Obtener las distribuciones de velocidad de viento, de caudal y de potencia. Construir las curvas características de funcionamiento de la instalación a lo largo del espectro de potencias suministrado por el aerogenerador en función de la velocidad del viento. Establecer la relación escalonada entre velocidad, potencia y caudal para el sistema elegido.

8.6.2 Caso práctico.

8.6.2.1 Definición

Como se ha expuesto anteriormente, el programa se ha desarrollado en base a la Planta Piloto de Las Salinas cuyas características básicas son las siguientes:

Localización:	Las Salinas. Juan Grande.
Configuración:	Monoetapa.
Nº de tubos:	1
Nº de membranas/tubo:	6
Membranas:	TFC 2822-SS-300 Premium
Fabricante:	KOCH – FLUID SYSTEMS

Tabla 8.4 Características de la planta piloto

Ion	Concentración (mg/l)
Amonio	0
Calcio	429.77
Magnesio	1342.85
Sodio	9900
Potasio	320
Bario	0
Estroncio	0
Silicato	0
Clorhídrico	18167.3
Sulfato	2653.45
Fluorhídrico	0
Nitrato	0
Carbonato	6.884
Bicarbonato	169.6
Boro	44.5
Otros	
T	20 °C
pH	8.1

Tabla 8.5: Composición del agua de 'Las Salinas'.

Para nuestro ensayo se va a sustituir la membrana de la planta, TFC 2822-SS-300 Premium de KOCH – FLUID SYSTEMS, por la membrana SW30HR-380 de DOW – FILMTEC que nos proporciona mejores resultados, y cuyas características se muestran en la Tabla .

Área (m2)	Caudal permeado (m3/d)	de Rechazo sales	de Presion maxima (bar)	Temperatura máxima (°C)	pH
35	22.71	99.70	69	45	2-11

Tabla 8.6: Características de la membrana SW30HR-380 de FILMTEC - DOW.

En la Figura 8.15 se representa el esquema básico de la planta que consiste simplemente en una bomba de alta presión que se encarga de impulsar el agua de alimentación al módulo de membranas.

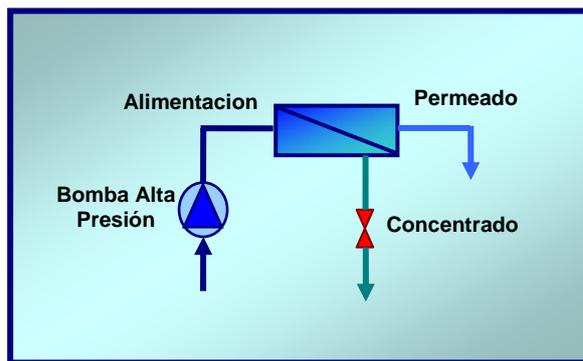


Figura 8.15: Esquema básico de la planta. Caso Práctico.

La bomba de alta presión de la instalación es de tipo volumétrica acoplada a un motor de 30 kW. Esta bomba proporciona un caudal máximo de 9.8 m³/h. El rango de presiones de trabajo es de 7 a 85 bar. Los límites de operación de la bomba se resumen en la tabla 8.7

	r.p.m. motor	r.p.m. bomba	Presión (bar)	Caudal (m ³ /h)	Potencia (kW)
Max	1500	375	85	9.8	26.43
Min	800	200	7	5.2	1.17

Tabla 8.7: Límites de operación de la bomba de alta presión.

8.6.2.2 Análisis del Agua de Alimentación

En la Figura 8.16, se muestra la pantalla de 'ENTRADA' después de introducir las características del agua de alimentación, concentración de cada uno de los iones, temperatura y pH; y calcular la concentración de total de sales.

En este caso, la concentración total de sales en el agua de alimentación es de 33034.3 mg/l.

ANÁLISIS DEL AGUA DE ALIMENTACION

IONES	Concentraciones mg/l
Amonio NH4	0
Potasio K	320
Sodio Na	9900
Magnesio Mg	1342.85
Calcio Ca	429.77
Estroncio Sr	0
Bario Ba	0
Carbonato CO3	6.884
Bicarbonato	169.6
Nitrato NO3	0
Clorhidrico Cl	18167.3
Fluorhidrico F	0
Sulfato SO4	2653.45
Silicato SiO2	0
Boro B	44.5

Introducir
 Concentracion ion
 Concentracion total

Otros parametros
 T: 20 °C
 pH: 8.1

Concentraciones
 Cero
 Predeterminado
 Previo
 Inicializar

Concentracion
 Actual
 Normal
 Predeterminar

Calcular
 TDS: 33034.3 mg/l

MENU
CONFIG
INICIO
POTENCIA
SALIR

Figura 8.16: Pantalla de Entrada. Caso Práctico.

8.6.2.3 Configuración de la Planta

En la Figura 8.17 se muestra la pantalla de configuración, en la cual se han introducido los datos de la planta que se enumeraron tabla XX.4, esto es, número de tubos y el número de membranas por tubo. El fabricante de las membranas es FILMTEC y el tipo de membranas que conforman el tubo es SW30HR-380.

En esta pantalla también se han introducido los parámetros de diseño de la instalación:

- Un caudal de permeado de 100 m³/d.
- Una conversión del 42%.
- Una presión en el permeado de 0 bar.
- Un factor de fouling de 0.8.
- Un rendimiento de la bomba del 80 %.
- Un rendimiento del motor del 90 %.

Figura 8.17: Pantalla de Configuración. Caso Práctico.

En esta pantalla tenemos tres opciones de cálculo:

- **Punto de funcionamiento**
- **Rango de operación**
- **Régimen variable**

Las dos primeras sólo dependen de la configuración de la planta y de las características del agua de mar, pero la última, 'Regimen variable' necesita la distribución de potencia.

8.6.2.4. Punto de Funcionamiento

Con los datos introducidos en los apartados anteriores obtenemos los resultados que se muestran en la Figura 8.18, para caudales y concentraciones en cada una de las membranas en sus tres regiones: alimentación, permeado y concentrado.

Vemos como ha aumentado la presión osmótica desde la alimentación con 22.79 bar hasta los 41.24 del concentrado final, que nos da una idea de cómo se incrementa la presión que necesita la membrana para producir permeado a medida que avanzamos en el tubo de membranas.

Como la presión de alimentación también disminuye a medida que avanzamos en la posición de la membrana dentro del tubo, la conversión también disminuye. Esto significa, como ya es sabido, que el rendimiento disminuye, es decir, que el proceso en las últimas membranas es mucho menos eficiente que en las primeras, estos valores nos permiten cuantificarlo.



Figura 8.18: Pantalla de Resultados del punto de funcionamiento. Caso Práctico.

En parte inferior de la pantalla se observa un recuadro con los avisos destinados a enumerar qué límites de operación de las membranas se han rebasado, y para qué número de membrana. En este caso, no se ha sobrepasado ningún límite.

Para corregir los avisos sería necesario modificar los parámetros de diseño convenientemente para no exceder los límites de operación recomendados por los fabricantes.

Finalmente, tenemos la posibilidad de representar la variación algunas variables con respecto a las membranas del tubo, para ver su evolución con mayor claridad. Las gráficas correspondientes se reúnen en la Figura 8.19.

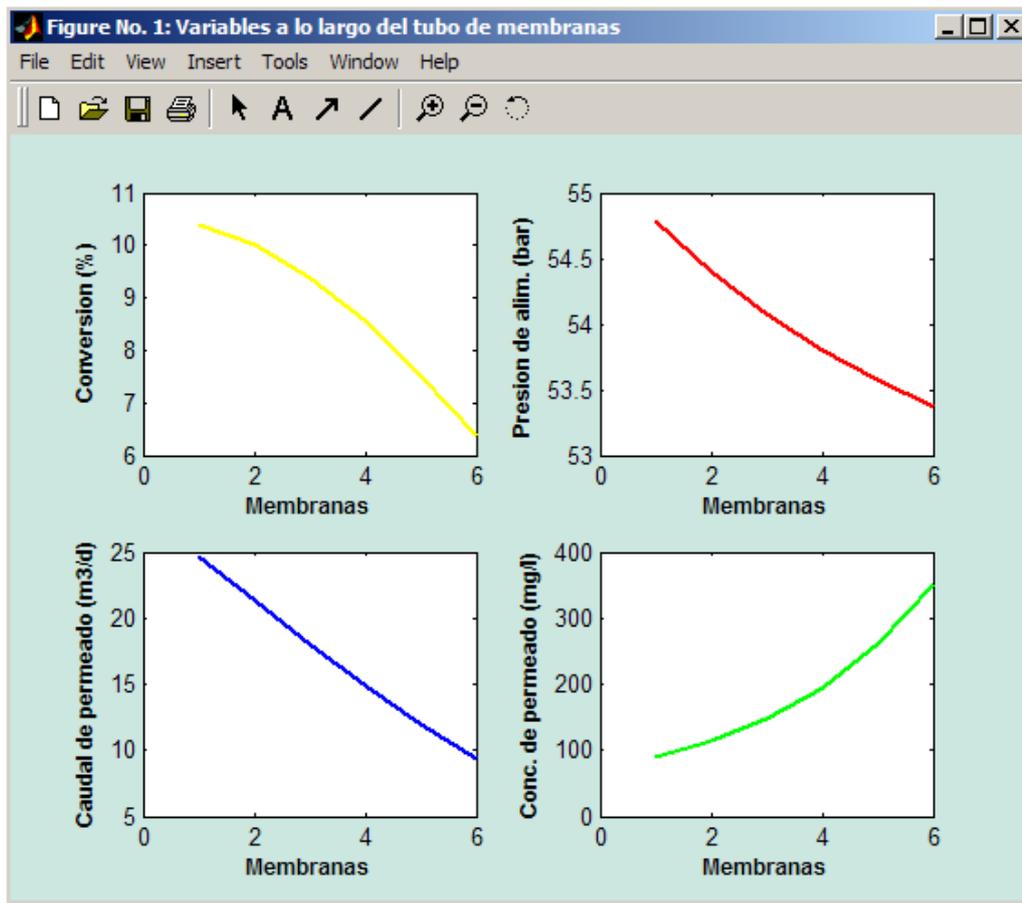


Figura 8.19: Pantalla de gráficas de Resultados del punto de funcionamiento. Caso Práctico.

8.6.2.5 Rango de Operación

Se ha obtenido una malla con los puntos de funcionamiento posible para esta configuración, considerando los siguientes límites:

- Límites derivados del rango de operación de la bomba.
- Límites recomendados por los fabricantes de las membranas.
- Límites determinados por el agua de alimentación:
- Presión osmótica = 22.79 bar.
- Límites impuesto por la concentración de sales en el agua producto:
- Máxima concentración de sales en el permeado = 500 mg/l.

En la Figura 8.20 se muestra la pantalla del rango de operación una vez introducidos los datos correspondientes a los límites que se van a considerar. En la misma pantalla se muestran los resultados para cada una de las variables.

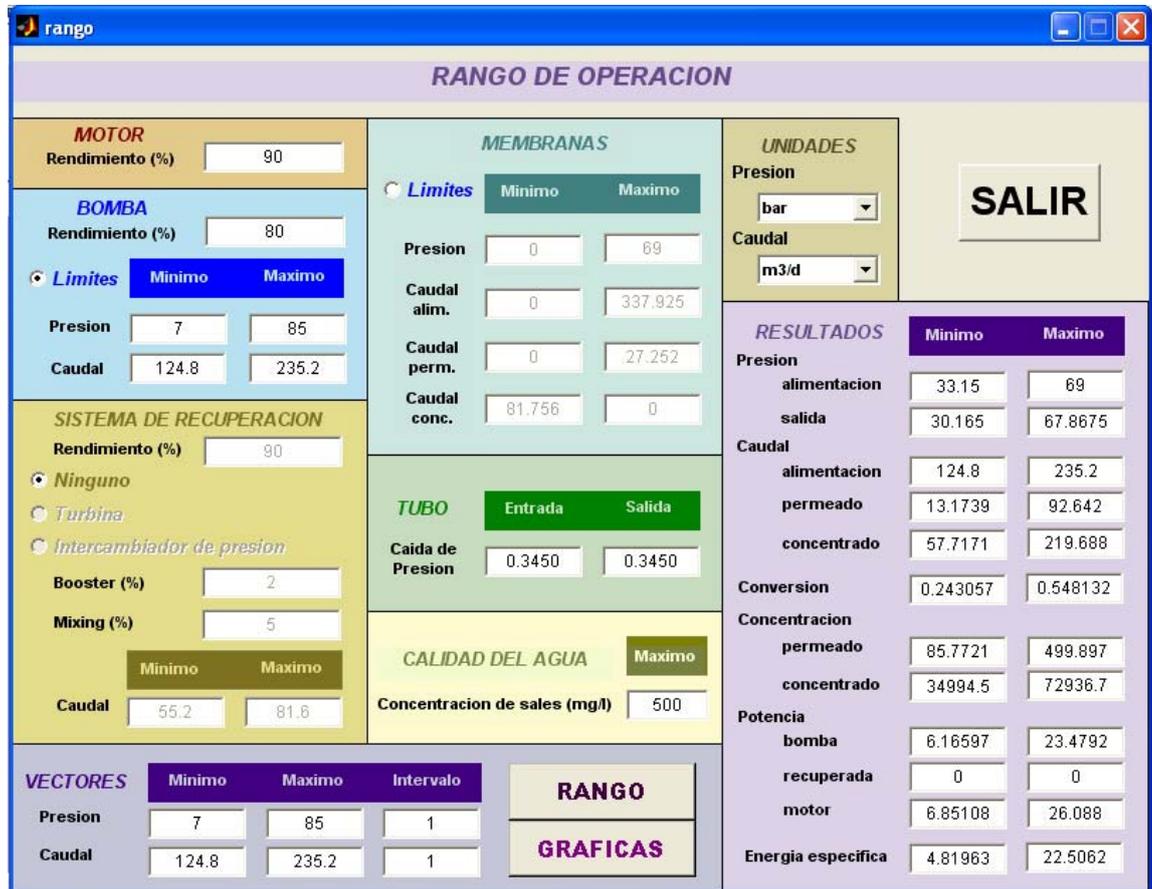


Figura 8.20: Pantalla de Rango de Operación: Caso Práctico.

El área de barrido consiste en un rectángulo cuyos lados quedan definidos por dos vectores de valores de caudal de alimentación y de presión de entrada. De esta forma para cada pareja de valores de presión y caudal se calcula los valores correspondientes de caudal y concentración de permeado, caudal, concentración y presión de concentrado, conversión, potencia y energía específica. Los puntos no válidos, es decir, aquellos que superan alguno de los límites de funcionamiento de las membranas quedan definidos por valores nulos de todas las variables.

A continuación se muestran los rangos de operación obtenidos para las variables más representativas en función del caudal de alimentación y la presión de entrada: caudal de permeado en la Figura 8.21, concentración de permeado en la Figura 8.22, conversión en la Figura 8.23, potencia del motor en la Figura 8.24 y energía específica Figura 8.25. Estas superficies muestran la forma en que estas variables evolucionan con los cambios en la presión de entrada y el caudal de alimentación. Así, se observa que las variaciones más importantes se producen en la dirección de la presión de entrada, mientras que las variaciones en la dirección

del caudal de alimentación son mucho más suaves. Por otra parte, se pone de manifiesto la relación más lineal con la presión de entrada de variables como el caudal de permeado, en contraste con otras como la concentración de permeado o la energía específica, o incluso, la conversión cuya variación es mucho más irregular.

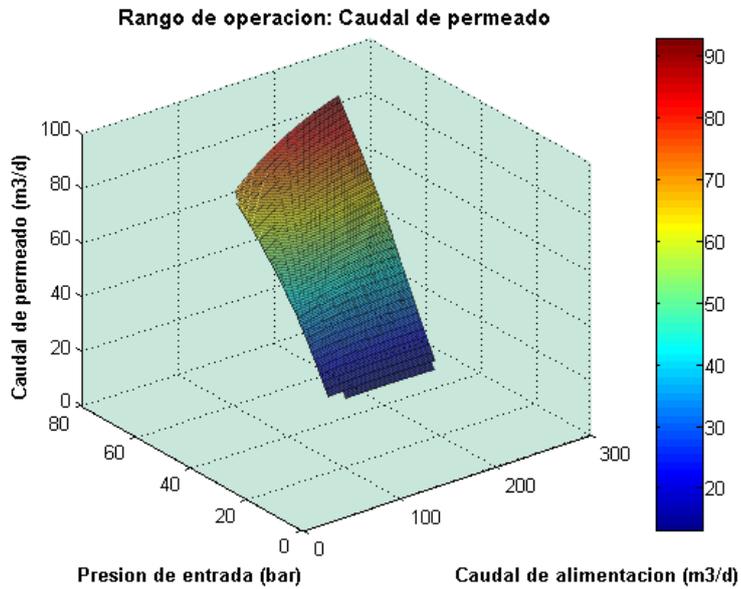


Figura 8.21: Caudal de permeado, Presión de entrada y Caudal de alimentación.

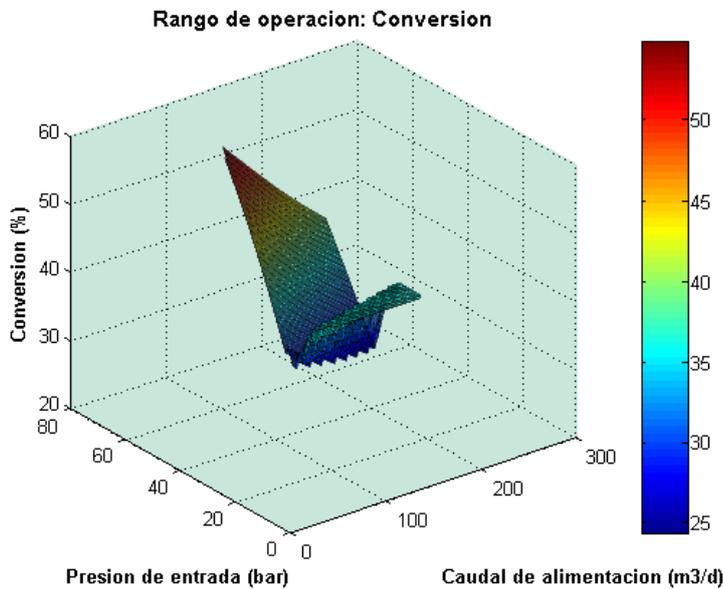


Figura 8.22: Conversión, Presión de entrada y Caudal de alimentación.

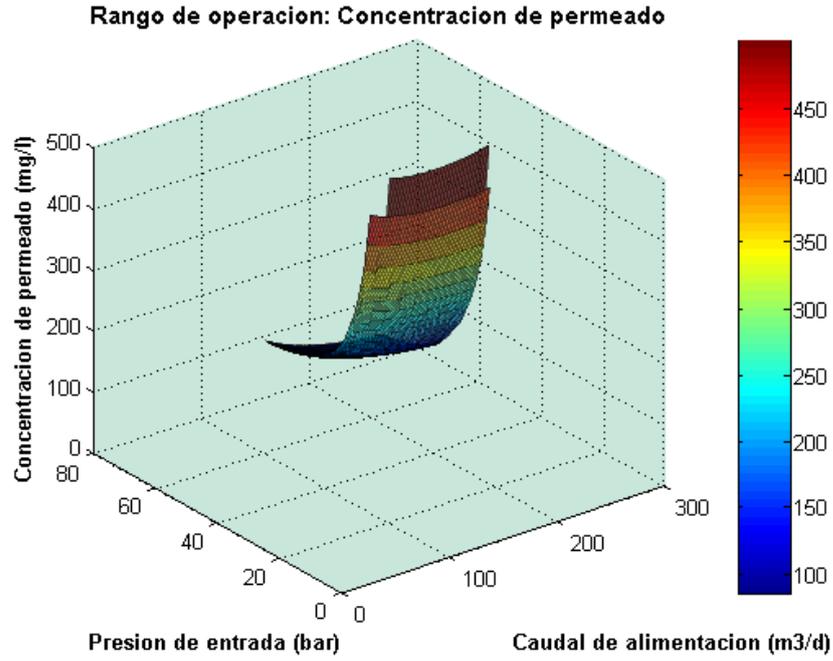


Figura 8.23: Concentración de permeado, Presión de entrada y Caudal de alimentación.

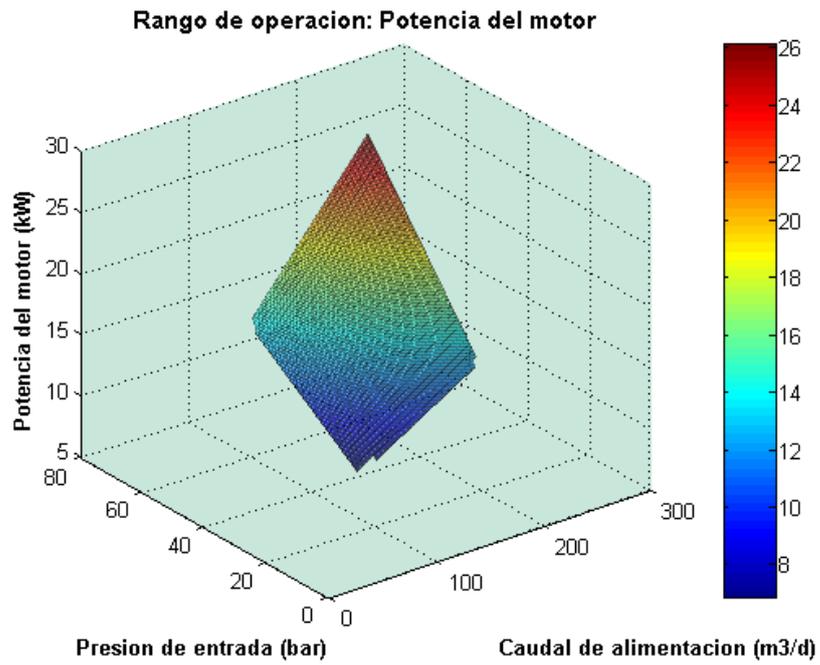


Figura 8.24. Potencia del motor, Presión de entrada y Caudal de alimentación.

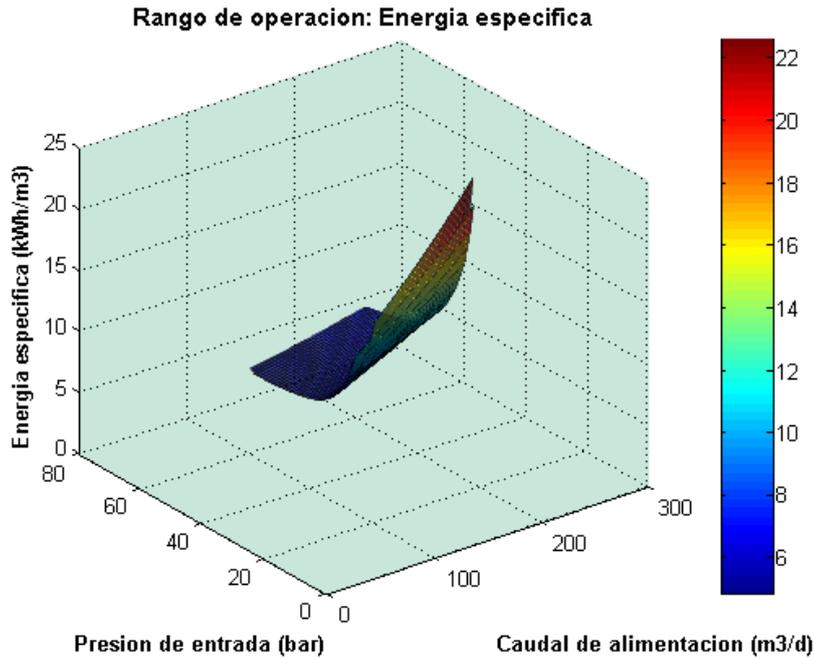


Figura 8.25: Energía específica, Presión de entrada y Caudal de alimentación.

Sin embargo, para observar con nitidez las relaciones entre las diferentes variables resulta mucho más eficaz la representación gráfica de dos variables. A continuación se exponen las relaciones que se han considerado más interesantes para estudiar el comportamiento en régimen variable.

En la Figura 8.26 se representa la relación que define el rango de operación de la planta: presión de entrada vs caudal de permeado. Esta relación determina el rango caudal de permeado que puede producirse para una presión de entrada fijada o, de forma inversa, el rango de presiones de entrada que determina una producción de permeado fijada. Si el objetivo es maximizar la producción, la instalación deberá funcionar cerca del límite inferior del área dibujada.

El rango para la presión de entrada queda definido en la Figura 8.27 para cada valor de la potencia que consume el motor que acciona la bomba de alta presión. Lo mismo ocurre en la Figura 8.28 para el caudal de permeado, definiendo así la familia de curvas características Potencia-Caudal para la instalación, de las cuales la óptima será la que determina el límite superior ya que es la que proporciona caudal de permeado máximo. Procediendo de manera análoga para el resto de las variables obtenemos el rango para la conversión en la Figura 8.29 que presenta un máximo superior al 50 % en torno a los 14 kW. En cuanto a la concentración de permeado, Figura 8.30 y la energía específica Figura 8.31, los valores óptimos, o lo que es lo mismo, los mínimos se obtienen prácticamente para la potencia nominal de la planta.

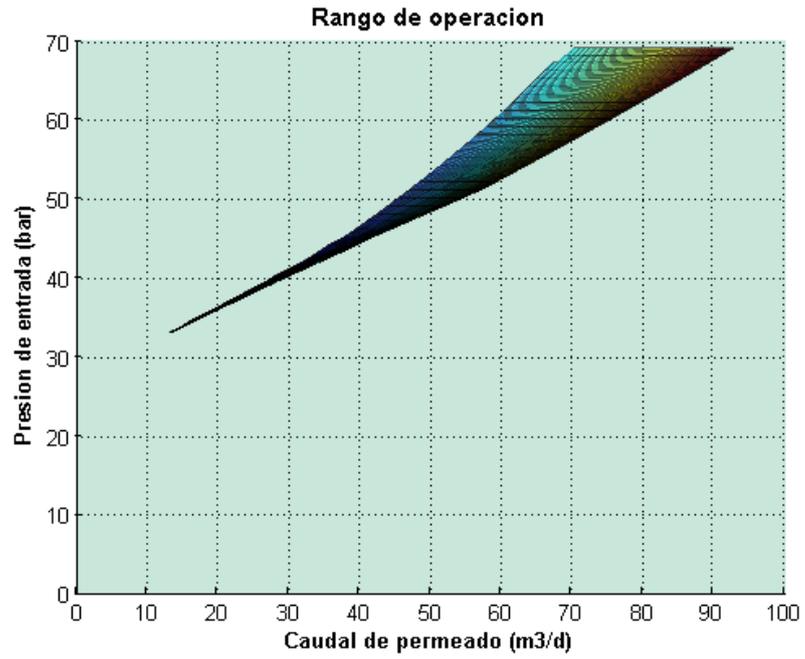


Figura 8.26: Presión de entrada vs Caudal de permeado.

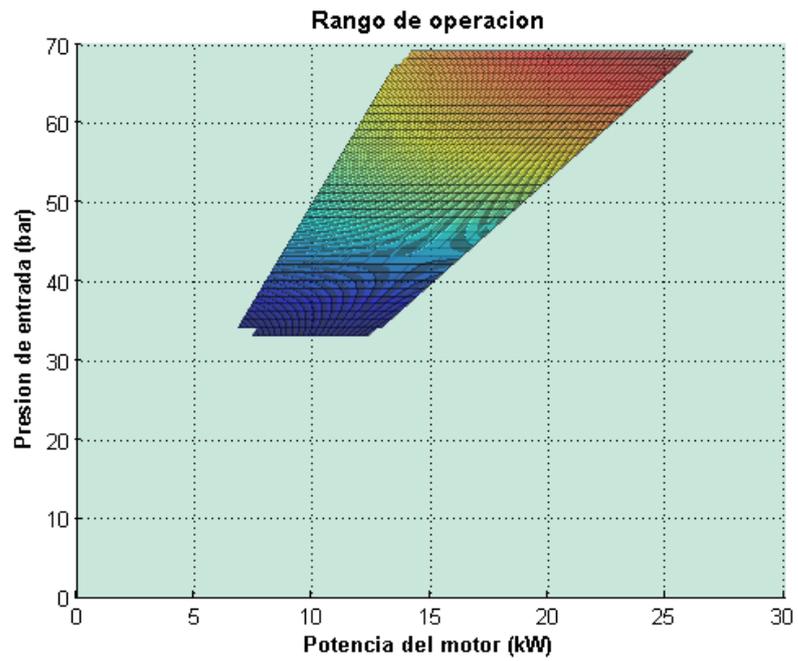


Figura 8.27: Presión de entrada vs Potencia del motor.

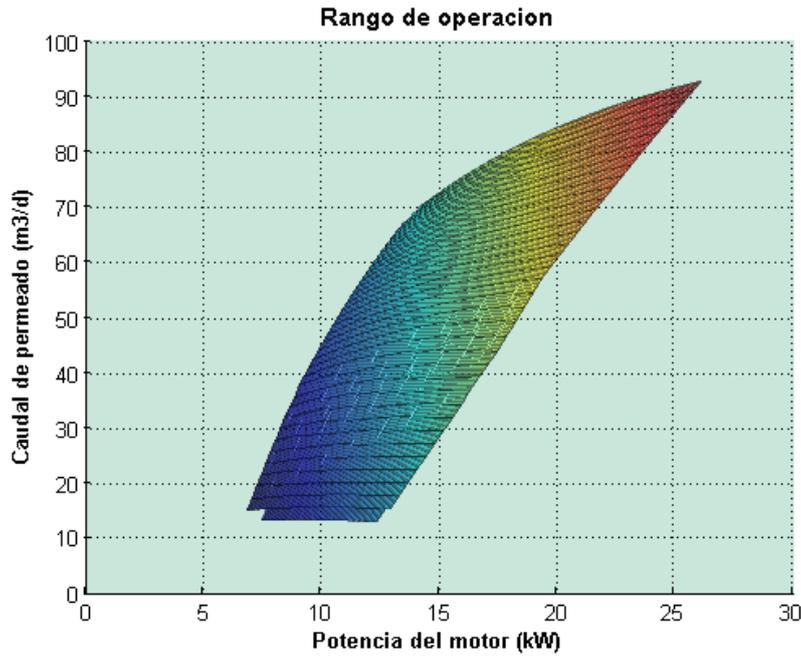


Figura 8.28: Caudal de permeado vs Potencia del motor.

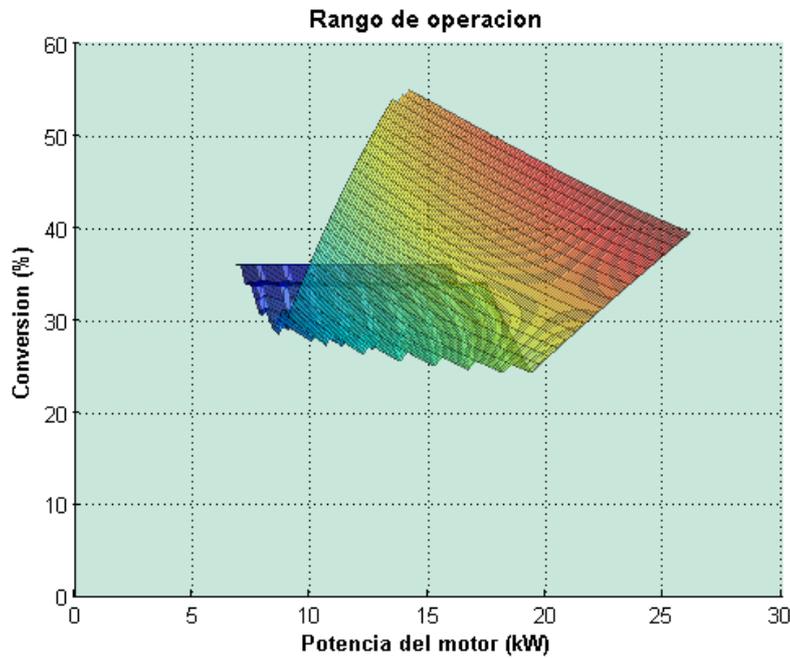


Figura 8.29: Caso Práctico. Conversión vs Potencia del motor.

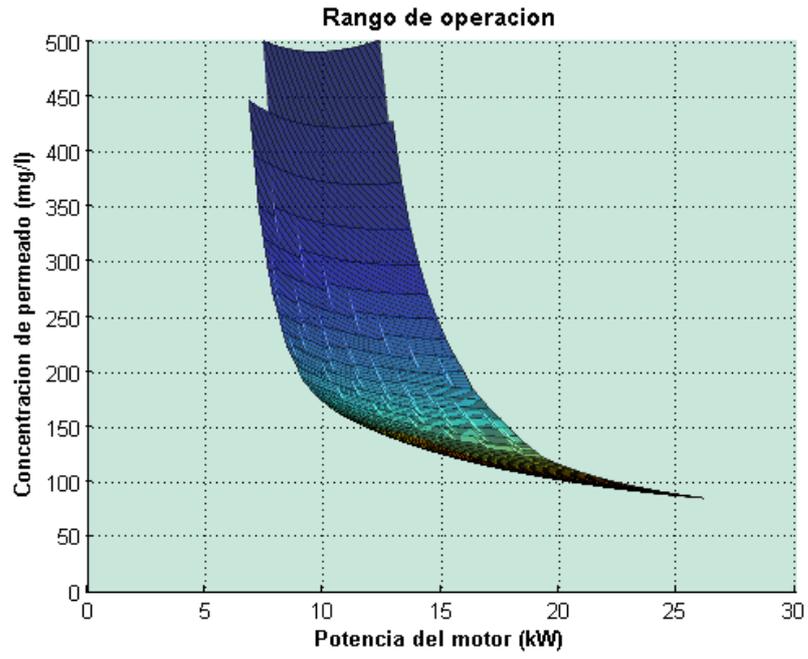


Figura 8.30: Concentración de permeado vs Potencia del motor.

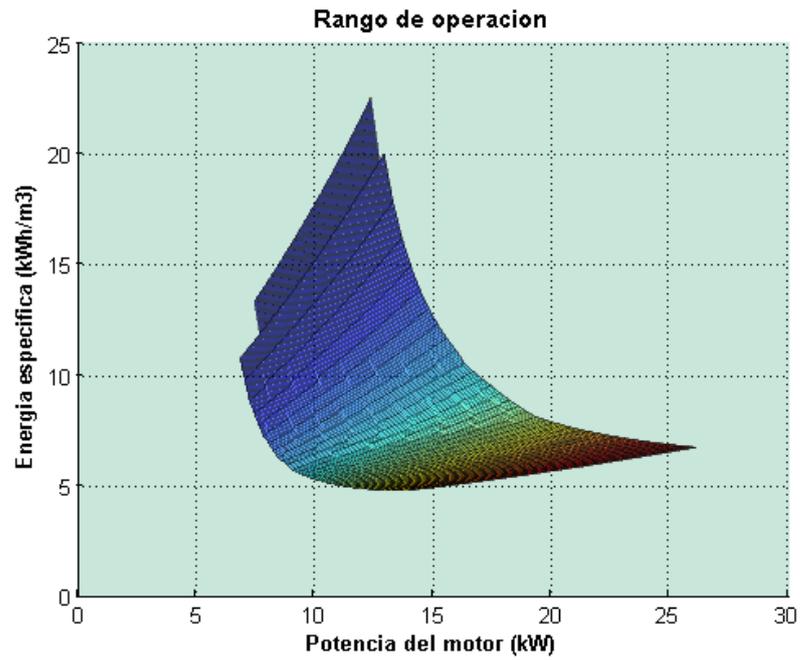


Figura 8.31: Energía específica vs Potencia del motor.

8.6.2.6 Cálculo de la Distribución de Potencia del Aerogenerador

Para estudiar el comportamiento de esta configuración con suministro de potencia variable vamos a acoplarle un aerogenerador que cubra la potencia que necesita la planta para funcionar, cuyas características principales se resumen en siguiente tabla.

Modelo	ECOTECNIA 12/30
Potencia nominal	30 kW
Velocidad nominal	10.5 m/s
Velocidad de conexión	3.5 m/s
Velocidad de corte	30 m/s
Diámetro del rotor	12 m
Altura del rotor	14 m

Tabla 8.8 Características aerogenerador

En la Figura 8.32 se muestra la pantalla de curva de potencia en la que se han insertado los siguientes datos:

Se ha elegido la opción de utilizar los datos de velocidad de viento reales.

Se han introducido las características de la zona:

1. Temperatura del aire = 20 °C
2. Altitud = 0 m, por lo tanto, únicamente se considera la altura del rotor para la corrección de la velocidad con la altura.
3. Se utiliza la densidad del aire corregida según altura y temperatura.
4. Se considera un tipo de terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m que define una longitud de rugosidad de 0.1.
5. Se corrige la velocidad con la altura considerando un perfil de velocidades logarítmico.

A continuación se realiza el análisis de los datos reales de velocidad de viento, para obtener los parámetros necesarios de la distribución de viento en la zona. En este emplazamiento se tienen los datos suministrados por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) consistentes en medidas de velocidad y dirección de viento a 10 m de altura tomados cada 10 minutos durante el año 2005, como ya se ha expuesto en el Capítulo VII.

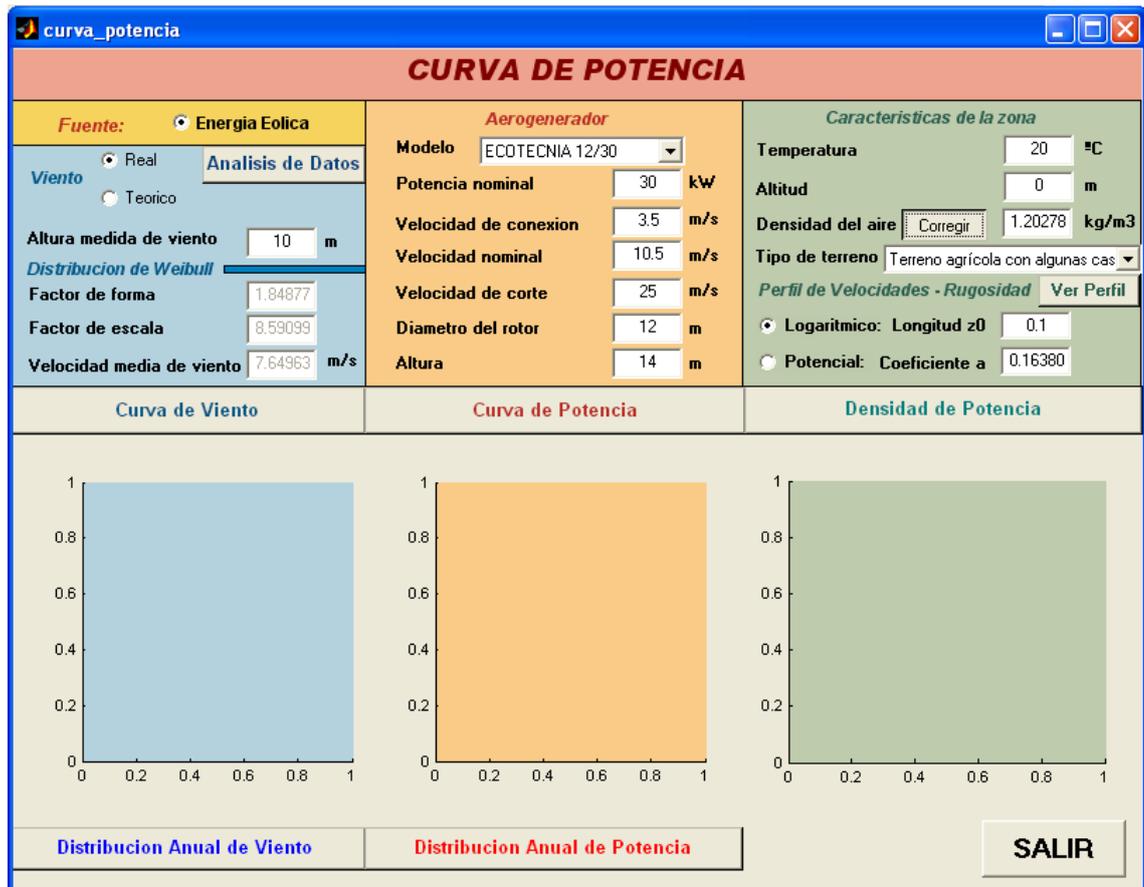


Figura 8.32: Pantalla de Curva de Potencia con datos: Caso Práctico.

En la Figura 8.33 se muestra la pantalla donde se deben introducir los datos de las medidas de velocidad y dirección del viento para su posterior análisis:

- Los valores de las medidas se introducen mediante un fichero de datos en formato 'ASCII'.
- Los datos correspondientes a la altura a la que se ha tomado la medida y el intervalo de las mismas, se introducen manualmente por el usuario en el apartado 'Datos de la medida'. En nuestro caso, la altura es de 10 m y el intervalo de 10 min.
- La altura de corrección de los valores de la velocidad se calcula de la suma de la altitud del emplazamiento elegido para la ubicación del aerogenerador y de la altura del rotor del mismo. Estos datos han sido introducidos anteriormente en la pantalla de 'Curva de Potencia'. En este caso será de 14 m.
- El resto de los datos necesarios para la corrección de los valores de la velocidad del viento también se han introducido anteriormente en la pantalla

de 'Curva de Potencia', esto es, perfil de velocidades logarítmico y longitud de rugosidad del terreno de 0.1.

- Los datos de velocidad del viento se corrigen antes de efectuar el análisis de los mismos.

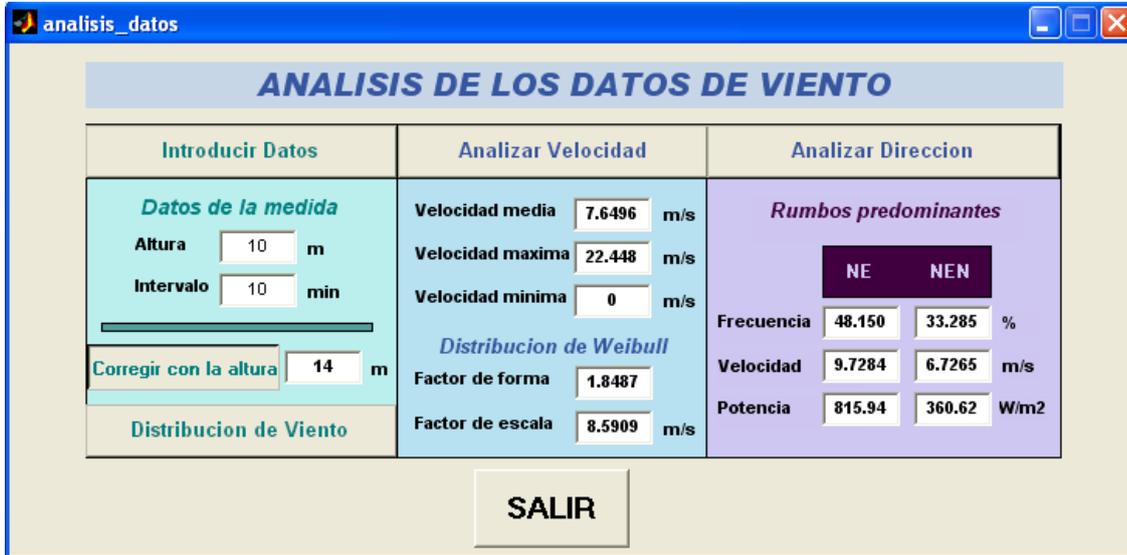


Figura 8.33: Pantalla de Análisis de los datos de viento: Caso Práctico.

La distribución anual de la velocidad del viento correspondiente a los datos de la velocidad del viento corregidos se puede observar en la Figura 8.34, en la cual se han incluido los valores de la velocidad máxima, la velocidad media y la velocidad mínima.

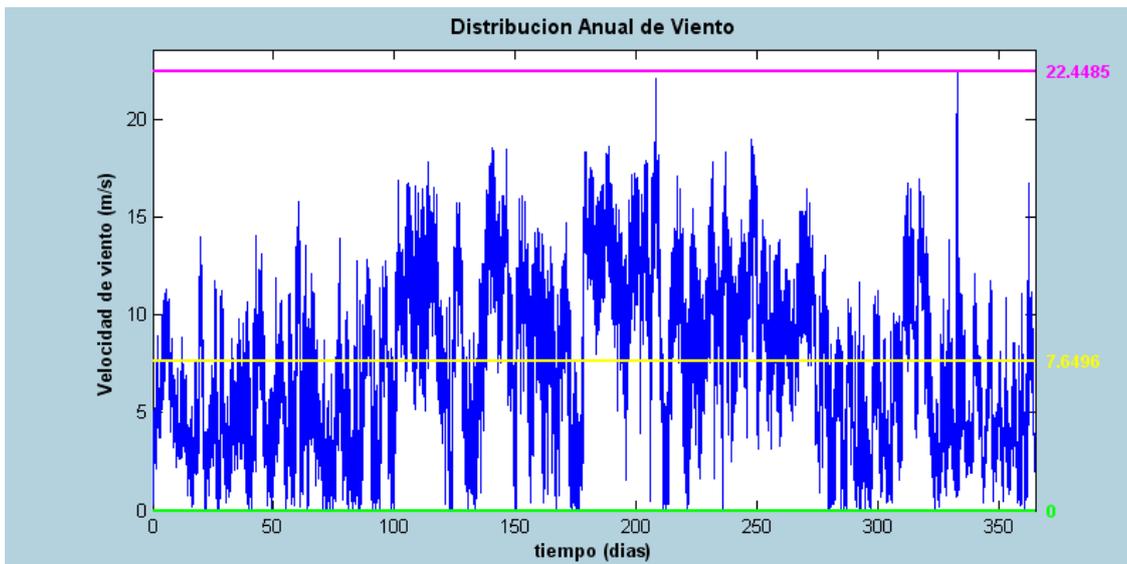


Figura 8.34: Distribución Anual de Viento: Caso Práctico.

Los resultados del análisis de velocidad se representan de gráficamente en la Figura 8.35:

Distribución de velocidad: Se ha representado la frecuencia real para clase de velocidad (de 0 a 25 m/s a intervalos de 1 m/s) en diagrama de barras y el ajuste de a la función de densidad de probabilidad mediante una línea continua. De esta forma, se obtiene una distribución de velocidad del viento definida por una función de Weibull caracterizada por un factor de forma de 1.85 y un factor de escala de 8.59 m/s, con una velocidad media de 7.65 m/s.

Horas de velocidad en un año: La distribución de velocidad del viento definida en el apartado anterior, también se puede cuantificar a través del número de horas en el año que el viento sopla a velocidades que se encuentran dentro de cada una de las clases definidas previamente. De esta forma se observa que a las velocidades entre 3 y 4 m/s les corresponden más de 750 horas, el máximo en la distribución real. Mientras que en la distribución de Weibull el máximo se encuentra por encima de las 800 horas para velocidades desde 5 hasta 8 m/s.

Frecuencia relativa acumulada: Esta curva representa la frecuencia con la que la velocidad del viento va a ser inferior a una determinada velocidad durante un año, por lo tanto, crece de manera continua a medida que aumenta la velocidad hasta llegar al máximo que es la unidad. De esta gráfica se desprende que aproximadamente la mitad del tiempo la velocidad del viento se encuentra por debajo de 8 m/s.

Duración de velocidad: La última curva representa justamente lo contrario de la anterior en horas, el tiempo en que la velocidad del viento será superior a un determinado valor. De esta gráfica se deduce que la duración de la velocidad media que caracteriza esta distribución de viento se encuentra en torno a las 4000 horas anuales.

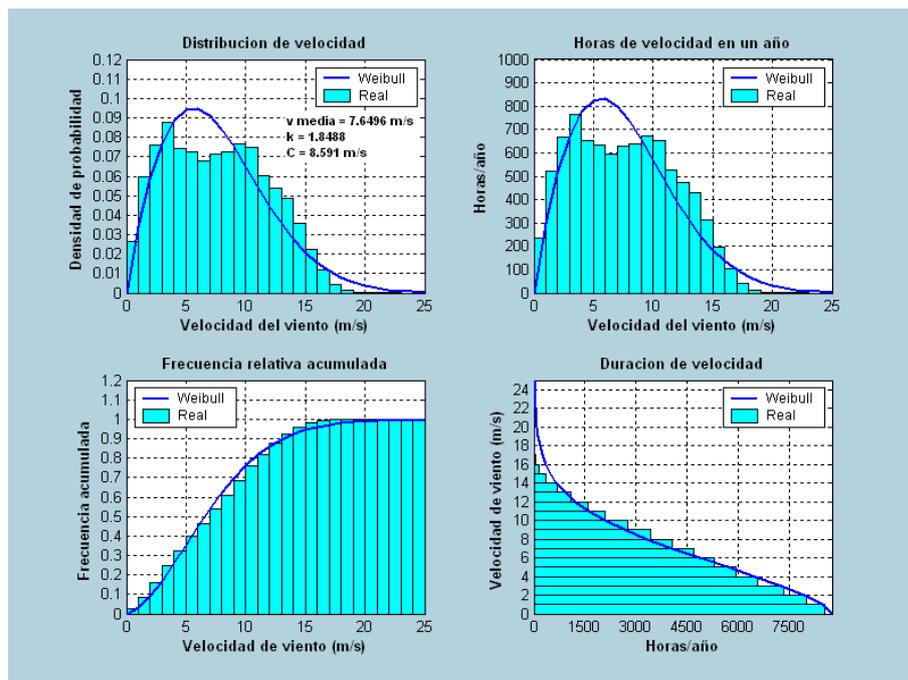


Figura 8.35. Resultados gráficos del análisis de los datos de velocidad del viento: Caso Práctico.

En cuanto al análisis direccional de viento, se ha empleado una rosa de los vientos de 16 rumbos, que se muestra en la Figura 8.36. En la cual se ha representado para cada rumbo en valores porcentuales: la frecuencia, la velocidad y la densidad de potencia. Se obtiene claramente que la dirección predominante es la NE, y en segundo lugar la NEN. Por otra parte, se observa que la diferencia en frecuencia entre ambas direcciones predominantes se aumente en términos de velocidad y, aun más en términos de densidad de potencia. Esto quiere decir que el rumbo más frecuente, es también el de mayor velocidad y, por lo tanto, el que aporta mayor potencia. Este es un factor fundamental a la hora de proyectar la instalación del aerogenerador.

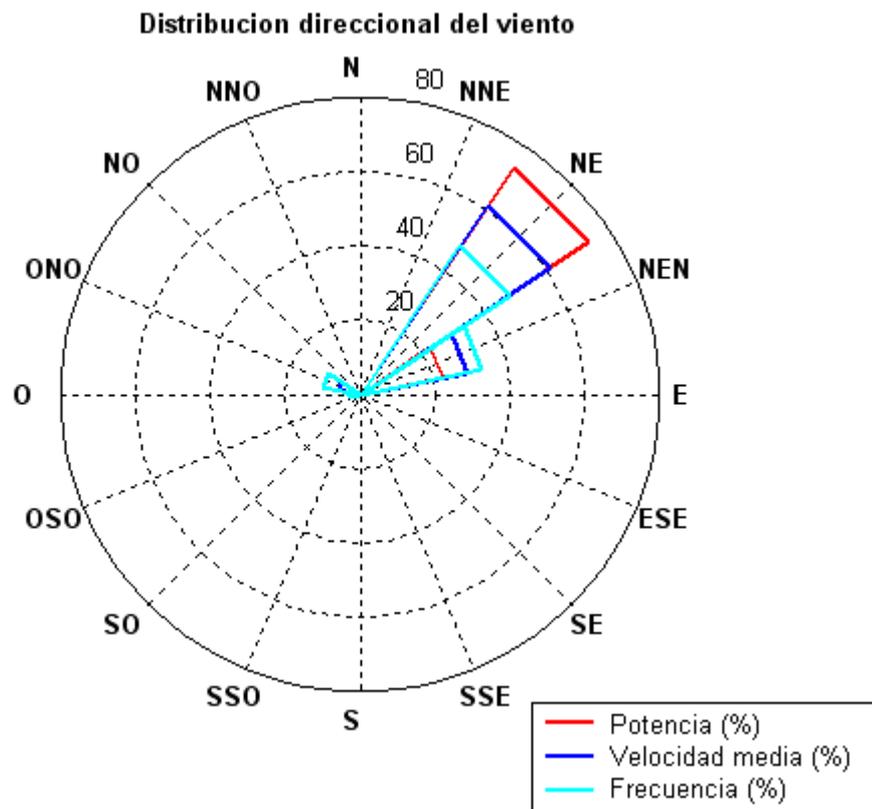


Figura 8.36. Distribución direccional del viento. Rosa de los vientos: Caso Práctico.

En la pantalla de 'Análisis de los datos de viento' (Figura 8.33) se resumen los resultados más significativos del análisis de velocidad:

- Velocidad media = 7.6496 m/s
- Velocidad media = 22.448 m/s
- Velocidad mínima = 0 m/s
- Factor de forma = 1.8487
- Factor de escala = 8.5909 m/s

y de dirección:

Rumbo predominante 1° = NE

Frecuencia = 48.150 %

Velocidad media = 9.7284 m/s

Densidad de potencia = 815.94 W/m²

Rumbo predominante 2° = NEN

Frecuencia = 33.285 %

Velocidad media = 6.7265 m/s

Densidad de potencia = 360.62 W/m²

En la Figura 8.37 se representa la distribución de la velocidad de viento que se ha obtenido como resultado del análisis previo, con los datos que se introducen en la pantalla de 'Curva de Potencia' de la Figura 8.32 para proseguir con el cálculo.

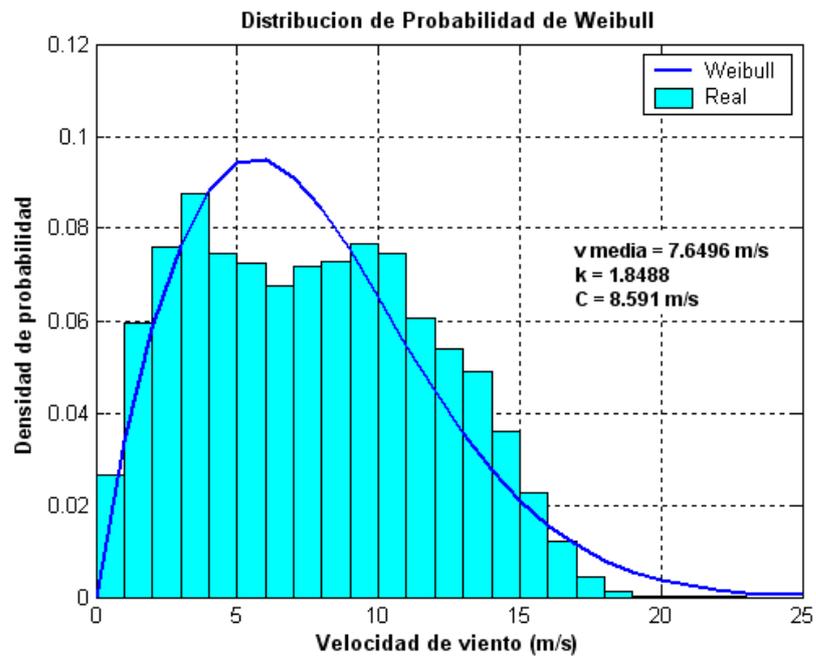


Figura 8.37: Distribución velocidad del viento: Caso Práctico.

En la Figura 8.38 se muestra la curva de potencia del aerogenerador elegido, ECOTECNIA 12/30, corregida considerando la densidad del aire a la temperatura correspondiente, 20 °C, y a la altura de corrección, 14 m. Estos dato determinan una densidad de 1.203 kg/m³, muy similar a la densidad estándar de 1.225 kg/m³ por lo cual las curvas resultan tan próximas.

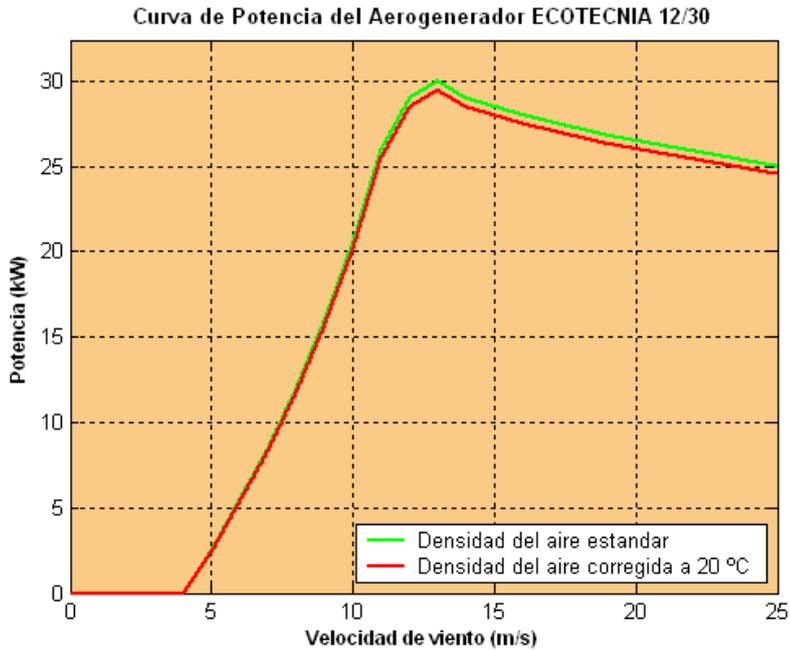


Figura 8.38: Curva de Potencia del Aerogenerador ECOTECNIA 12/30: Caso Práctico.

Del producto de la potencia específica (W/m^3) que se obtiene dividiendo la potencia entre el área del rotor por la probabilidad de la velocidad correspondiente a esa frecuencia se obtiene la densidad de potencia. En la Figura 8.39 se representa la densidad de potencia para:

La potencia contenida en el viento (en color azul). El área encerrada bajo la curva da como resultado una densidad de potencia total de $547.64 W/m^2$, esto es la potencia que contiene el viento en la zona que se ha estudiado.

La ley de Betz (en color verde), reducido en un factor de $16/27$ de la densidad de potencia contenida en el viento. Este área de $324.53 W/m^2$ define el límite teórico para la cantidad de potencia máxima que se puede extraer del viento.

La potencia generada (en color rojo), que para el aerogenerador considerado la densidad de potencia total es de $102.89 W/m^2$.

En nuestro caso, nuestro objetivo es estudiar el comportamiento de nuestra planta con suministro de potencia variable. Por este motivo se ha elegido un aerogenerador tan pequeño (30 kW), cuya potencia nominal cubra las necesidades de potencia de la planta a lo largo de todo el rango de operación de forma más o menos ajustada para obligarla a funcionar en régimen variable. De ahí, que la mayoría de la potencia no es aprovechada, si nuestro objetivo fuese obtener la máxima potencia el aerogenerador evidentemente sería mayor.

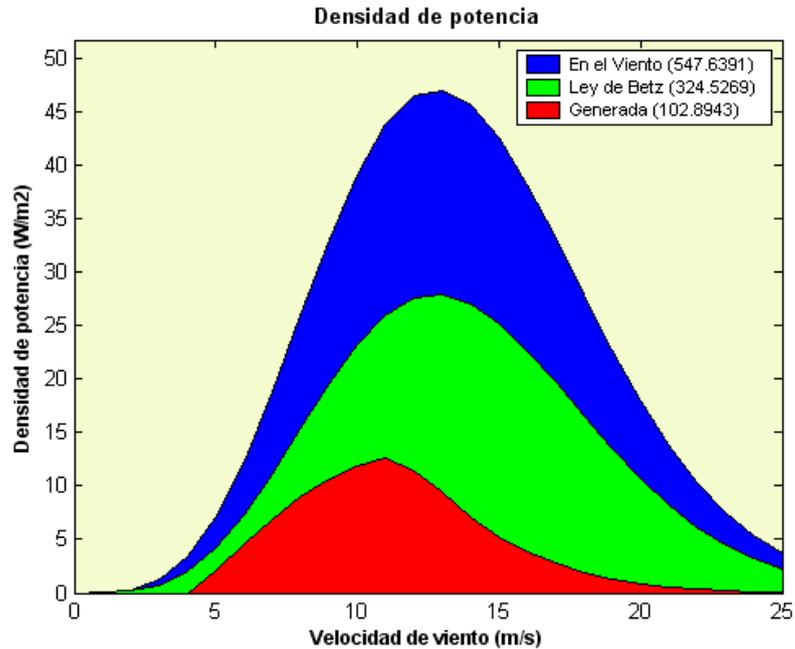


Figura 8.39: Densidad de Potencia: Caso Práctico.

En la pantalla de 'Curva de Potencia' se resumen los datos utilizados y los resultados obtenidos a lo largo del procedimiento de cálculo de la potencia como se puede observar en la Figura 8.40.

El resultado obtenido es la distribución anual de potencia generada que se muestra en la Figura 8.41, en la cual se han incluido los valores de potencia máxima, 29.51 kW, potencia media, 12.38 kW, y potencia mínima, 0 kW. Como se puede observar la potencia máxima es menor que la potencia máxima del aerogenerador. Esto se debe, por una parte, a la forma de la curva de potencia del aerogenerador que solo alcanza la potencia nominal para un intervalo de velocidades de viento muy restrictivo; y, por otra parte, a la corrección de la potencia con la densidad del aire para las condiciones del emplazamiento.

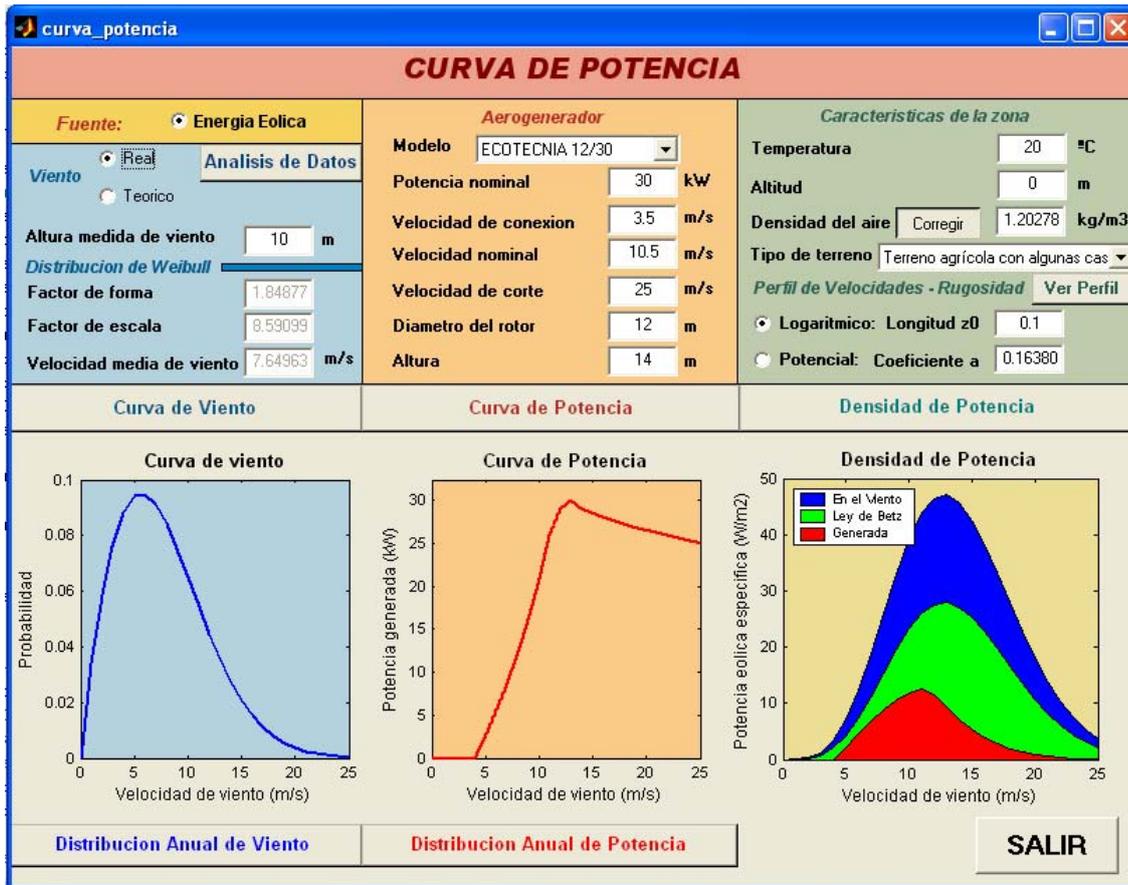


Figura 8.40: Pantalla de Curva de Potencia con resultados: Caso Práctico.

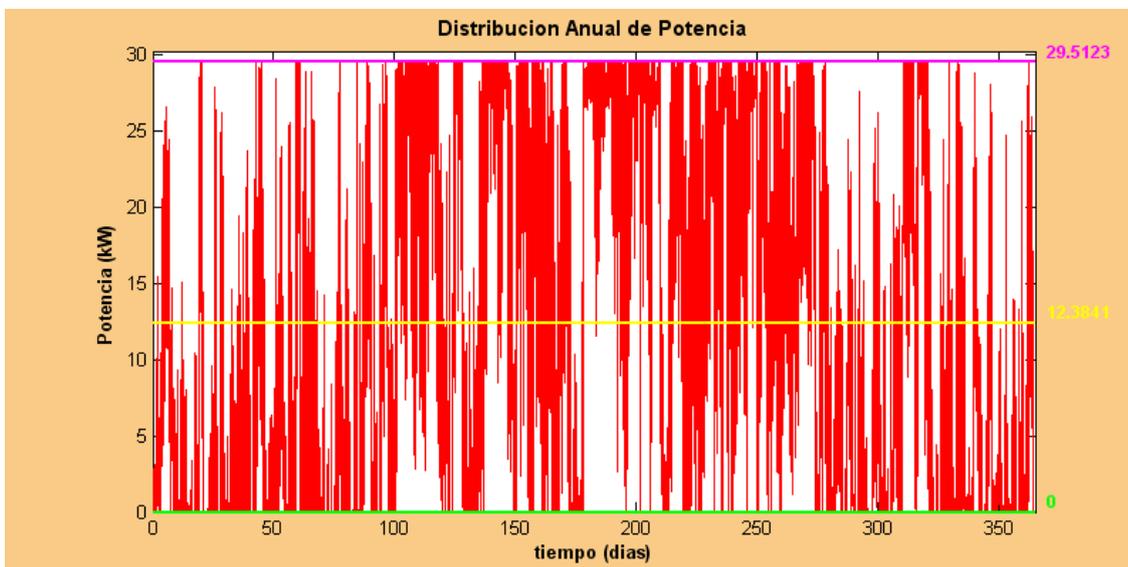


Figura 8.41: Distribución Anual de Potencia: Caso Práctico.

8.6.2.7 Análisis del Régimen Variable

Una vez resueltos los apartados anteriores se han obtenido los datos necesarios para estudiar el comportamiento de la planta en régimen variable.

Para una distribución de velocidad del viento cuya curva de probabilidad ajustada a la función de Weibull se representa en la Figura 8.42, y un aerogenerador con una curva de potencia característica tal como la que muestra la Figura 8.43, se obtiene una curva característica P-Q para la instalación en régimen variable como la que muestra la Figura 8.44. De la combinación de las gráficas de las gráficas anteriores se obtiene la relación entre la velocidad del viento y el caudal de permeado producido que se muestra en la Figura 8.45. De esta forma trasladamos el intervalo de potencias en que la planta trabaja en régimen variable de 6 a 26 kW aproximadamente, a un intervalo de velocidades del viento de 7 a 11 m/s aproximadamente.

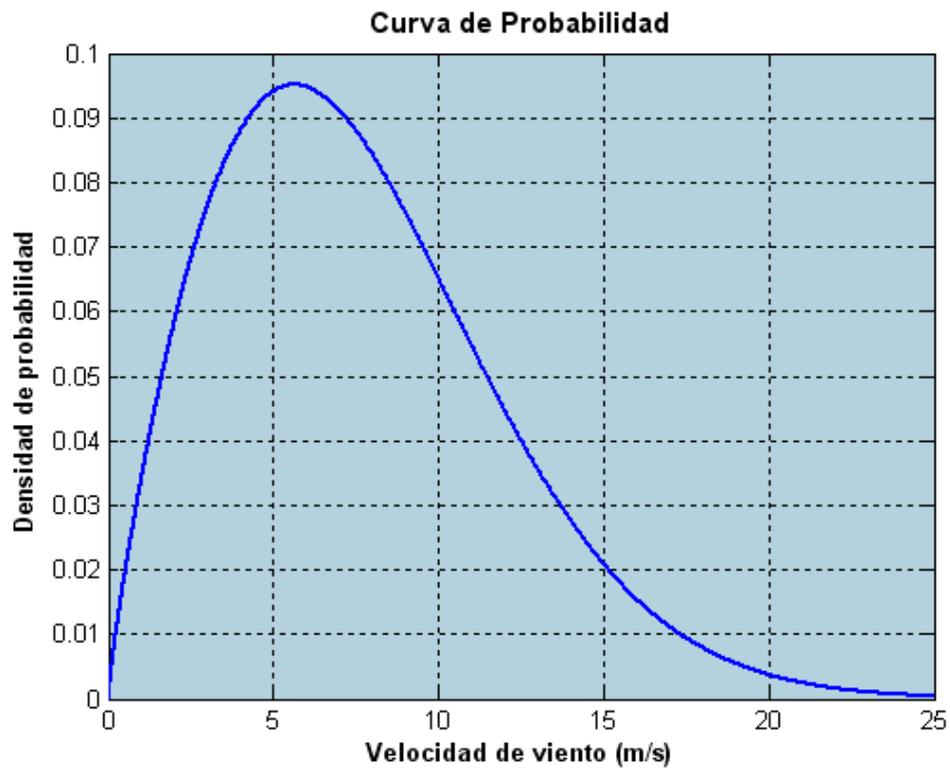


Figura 8.42: Curva de probabilidad de velocidad del viento: Caso Práctico.

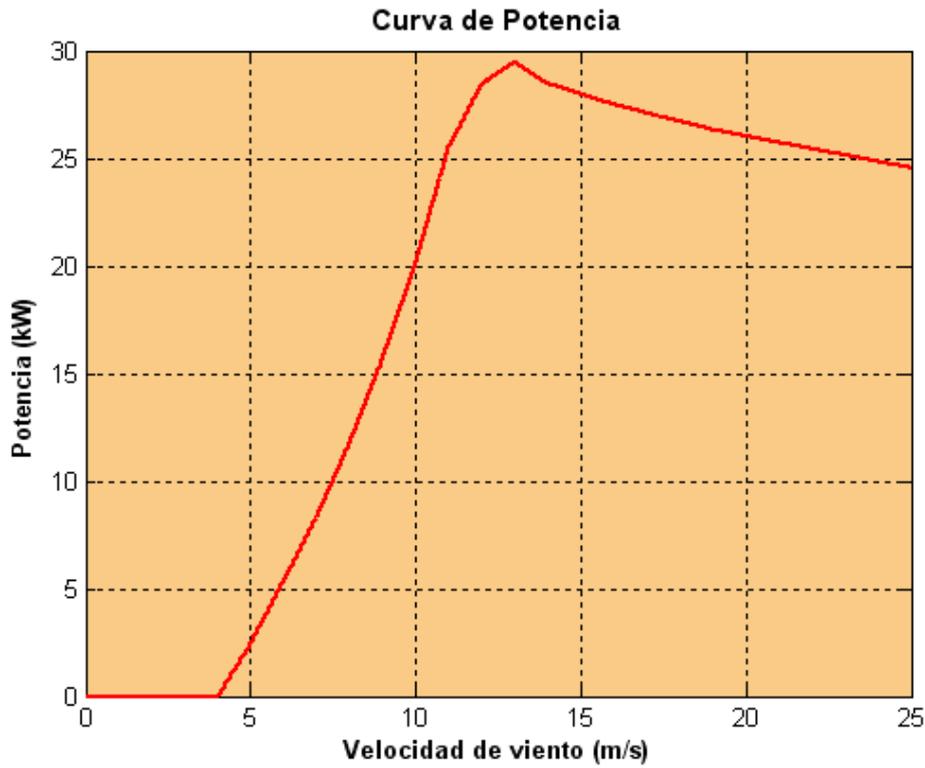


Figura 8.43: Curva de potencia del aerogenerador: Caso Práctico.

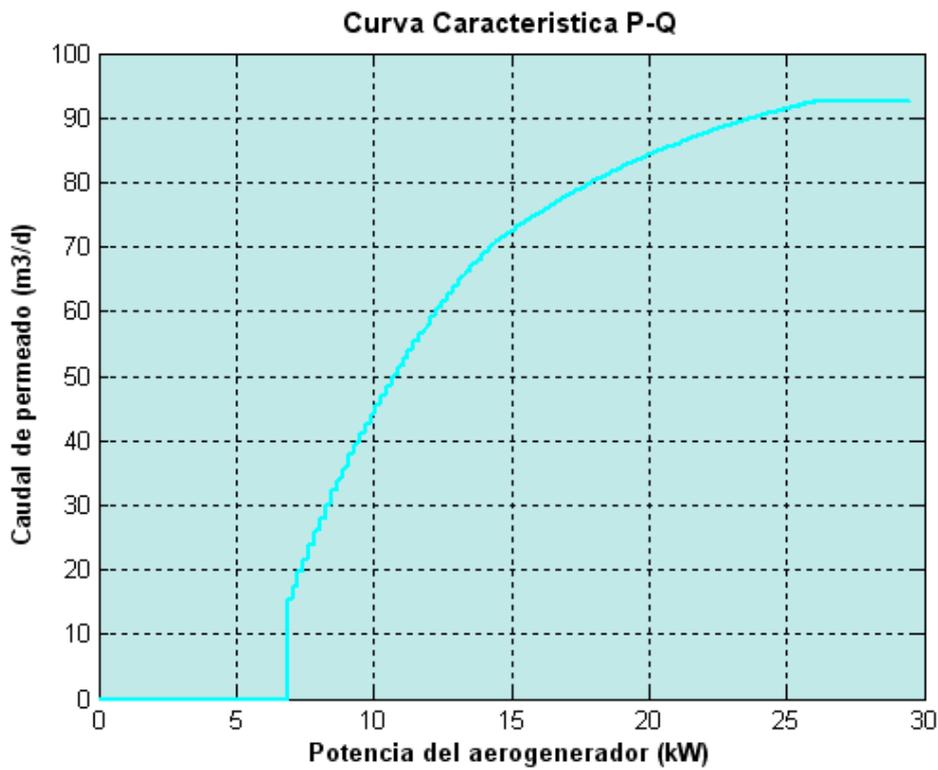


Figura 8.44: Curva característica P-Q: Caso Práctico.

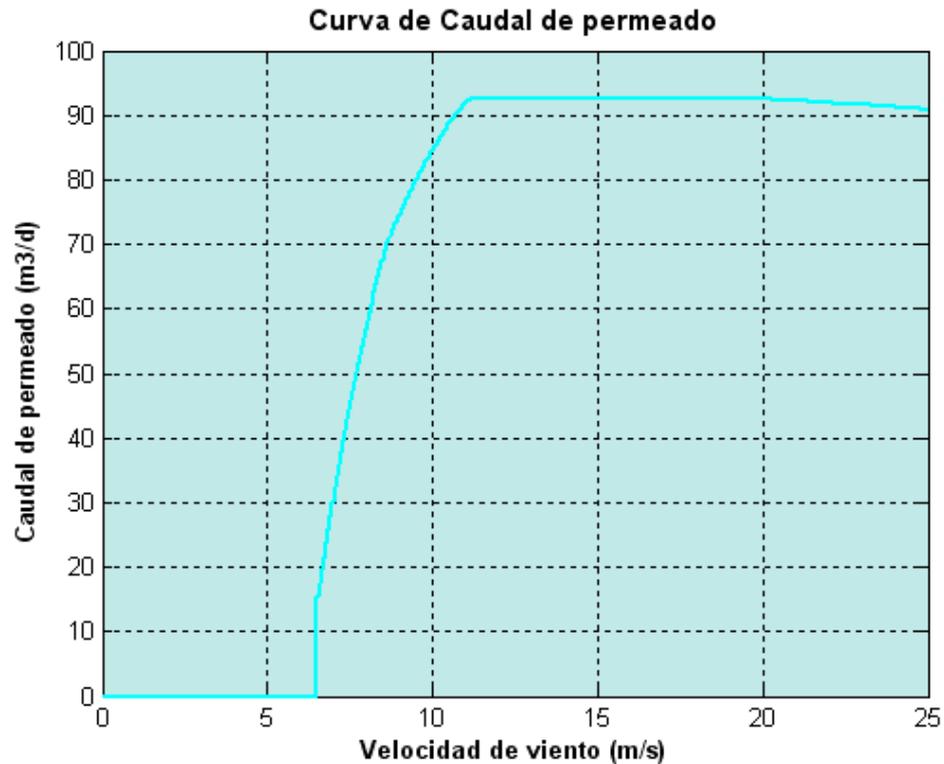


Figura 8.45: Curva de caudal de permeado: Caso Práctico.

En la Figura 8.46 se muestra de forma conjunta la distribución anual de velocidad del viento, potencia generada y caudal de permeado producido. La distribución de velocidad y de potencia se ha obtenido en el apartado 0. Para obtener la correspondiente al caudal de permeado el proceso es el siguiente:

- 1º)** Se seleccionan los puntos del rango de funcionamiento en los cuales la potencia consumida por el sistema es inferior a la suministrada por el aerogenerador en ese instante.
- 2º)** Se elige de entre todos los puntos de funcionamiento que cumplen la condición anterior aquel proporciona el caudal de permeado máximo.
- 3º)** De esta manera se obtiene para cada punto de potencia su correspondiente valor de caudal de permeado y se construye dicha curva.

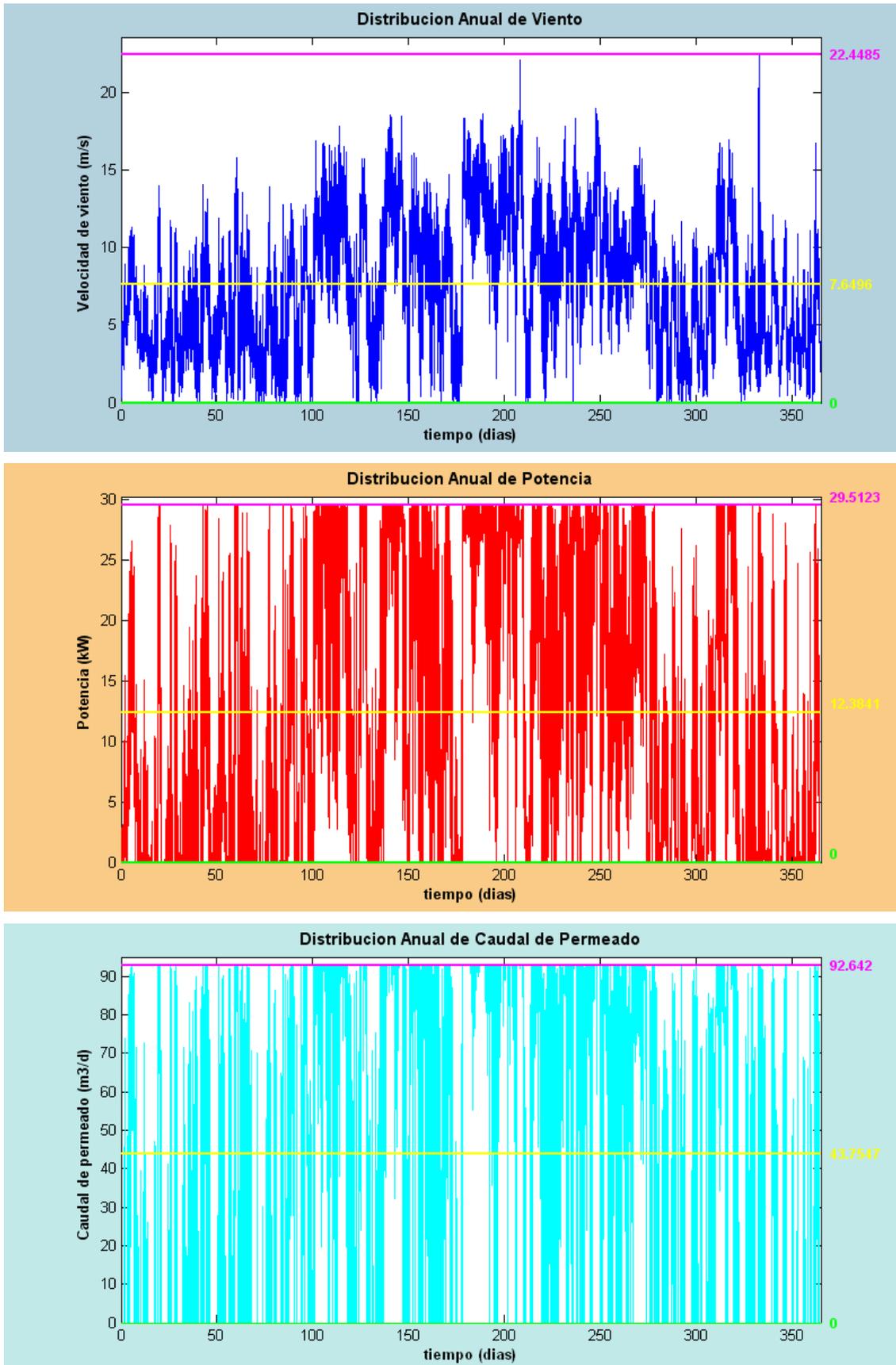


Figura 8.46: Distribución Anual de Viento, Potencia y Caudal: Caso Práctico.

La distribución de frecuencias de la potencia generada, se ha dividido en tres zonas. La primera zona (31.82%) representa los valores de potencia no son suficiente para que la planta comience funcionar, y por lo tanto, esa potencia no podrá ser aprovechada por la planta. La segunda zona (57.97%) considera todos los valores de potencia que obligan a la planta a funcionar en régimen variable, sin llegar a la zona de funcionamiento nominal o de diseño. Y la tercera zona sólo tiene en cuenta los valores de potencia permiten el funcionamiento nominal de la planta. La distribución de caudal de permeado muestra el aumento escalonado de los pequeños porcentajes de producción, nunca superan el 10%, para valores de caudal de permeado dentro del régimen variable, hasta alcanzar la zona de funcionamiento nominal de la planta en la que se observa un mayor aumento que supera el 25% de frecuencia.

Se ha realizado un análisis estadístico a través del cual se han obtenido las frecuencias correspondientes a las clases definidas para la velocidad del viento (Figura 8.47), para la potencia del aerogenerador (Figura 8.48) y para el caudal de permeado (Figura 8.49). Mientras la velocidad del viento tiene una forma acampanada con los máximos en la parte central, la potencia generada y el caudal de permeado tienen sus máximos en los extremos.

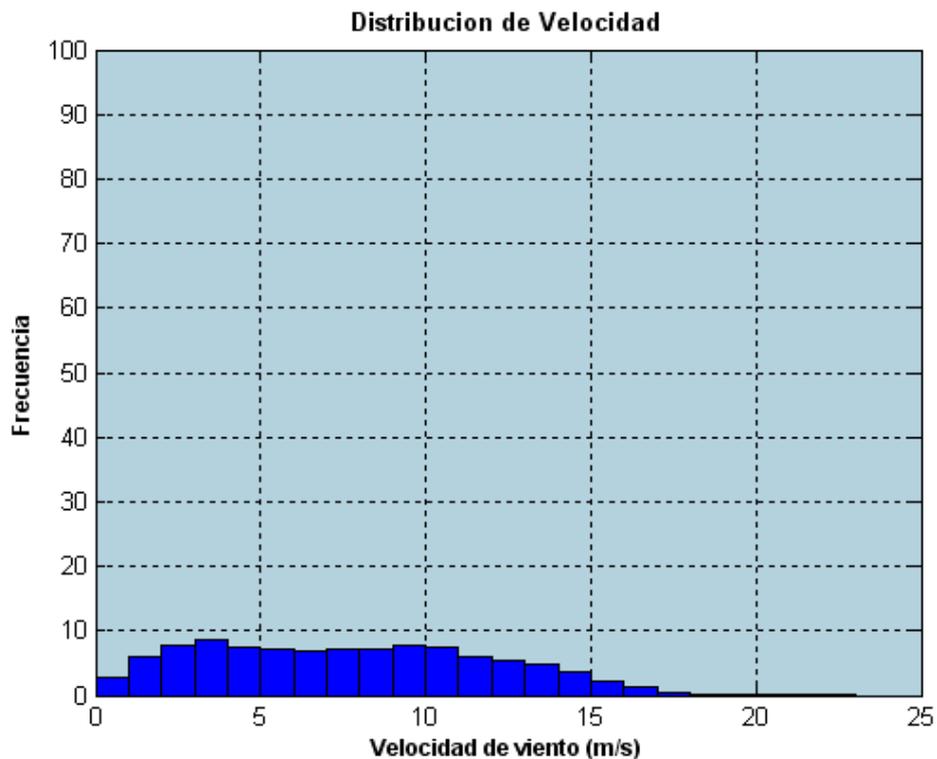


Figura 8.47: Distribución de velocidad del viento: Caso Práctico.

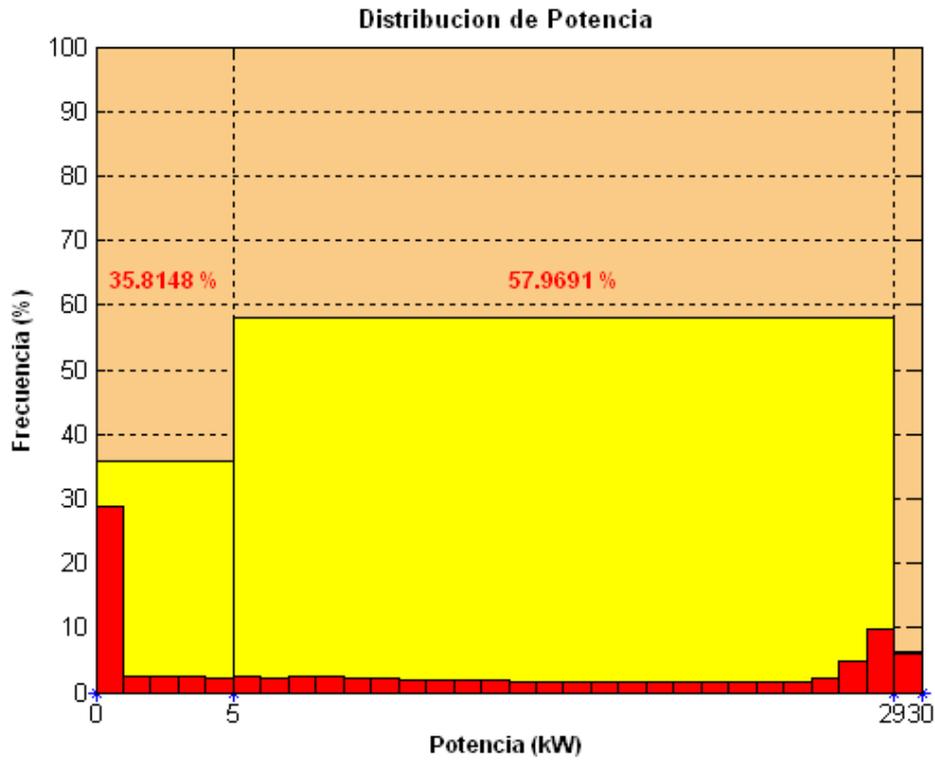


Figura 8.48: Distribución de potencia generada: Caso Práctico.

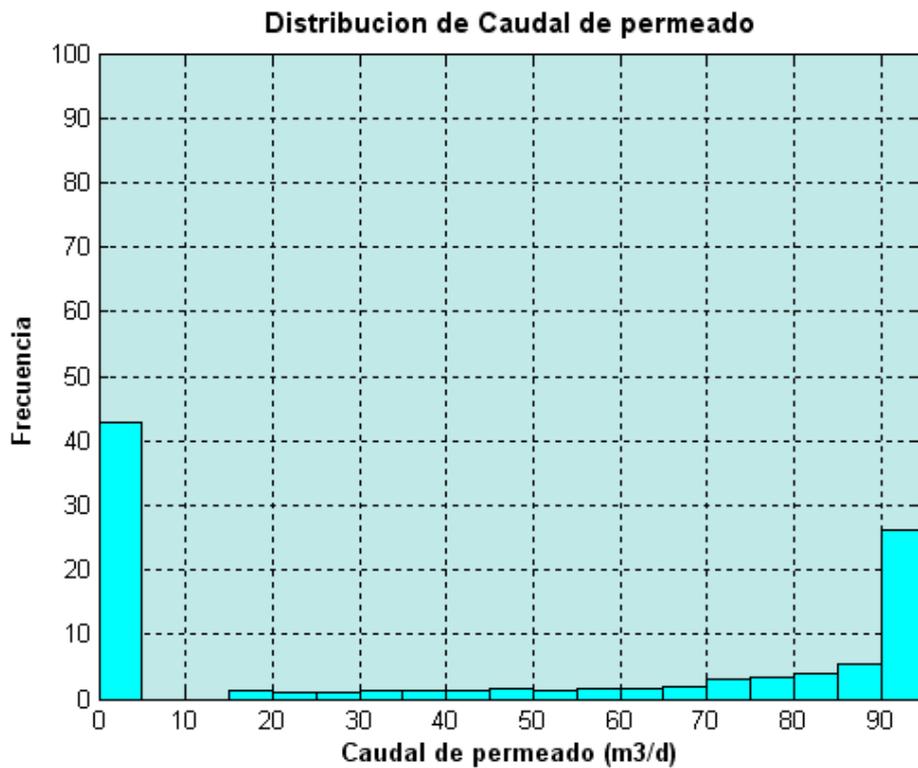


Figura 8.49: Distribución de caudal de permeado: Caso Práctico.

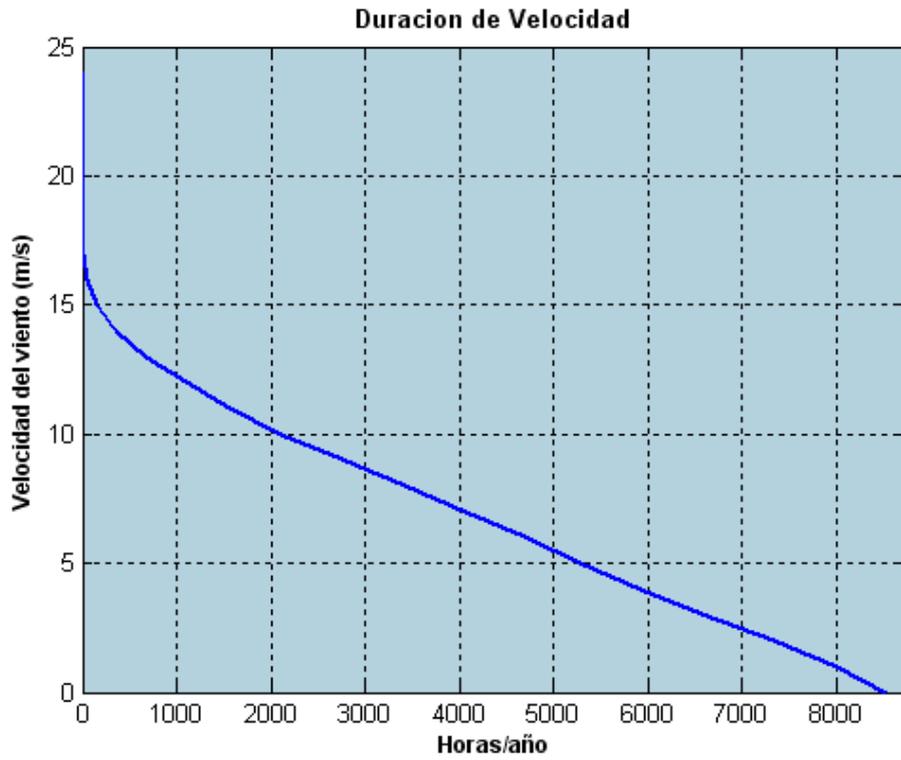


Figura 8.50: Curva de duración de velocidad del viento: Caso Práctico.

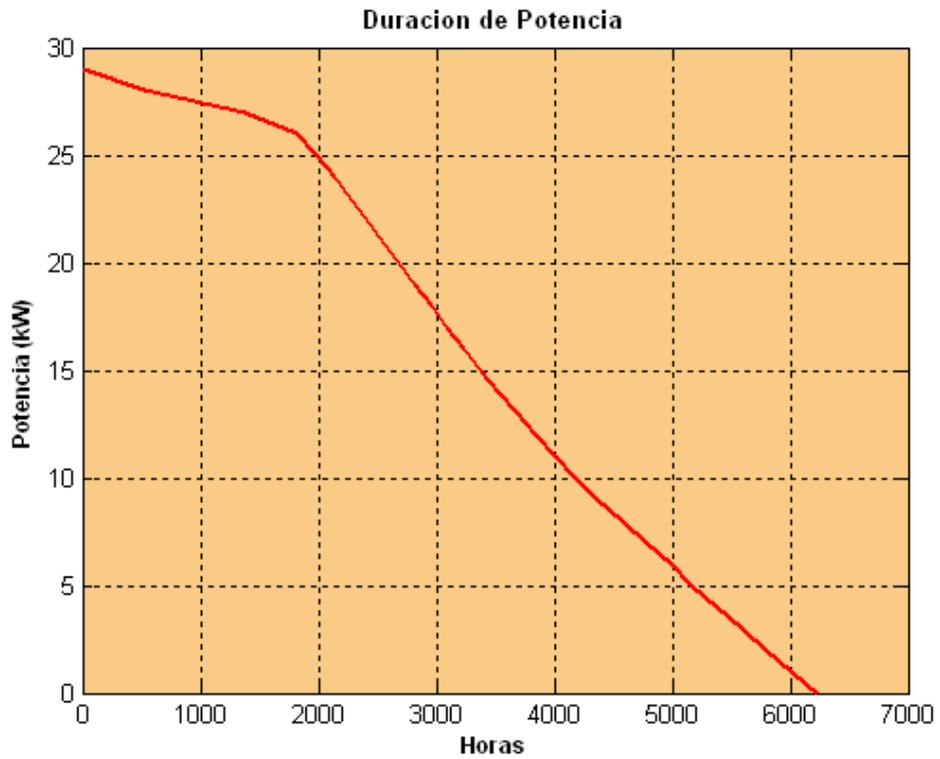


Figura 8.51: Curva de duración de potencia: Caso Práctico.

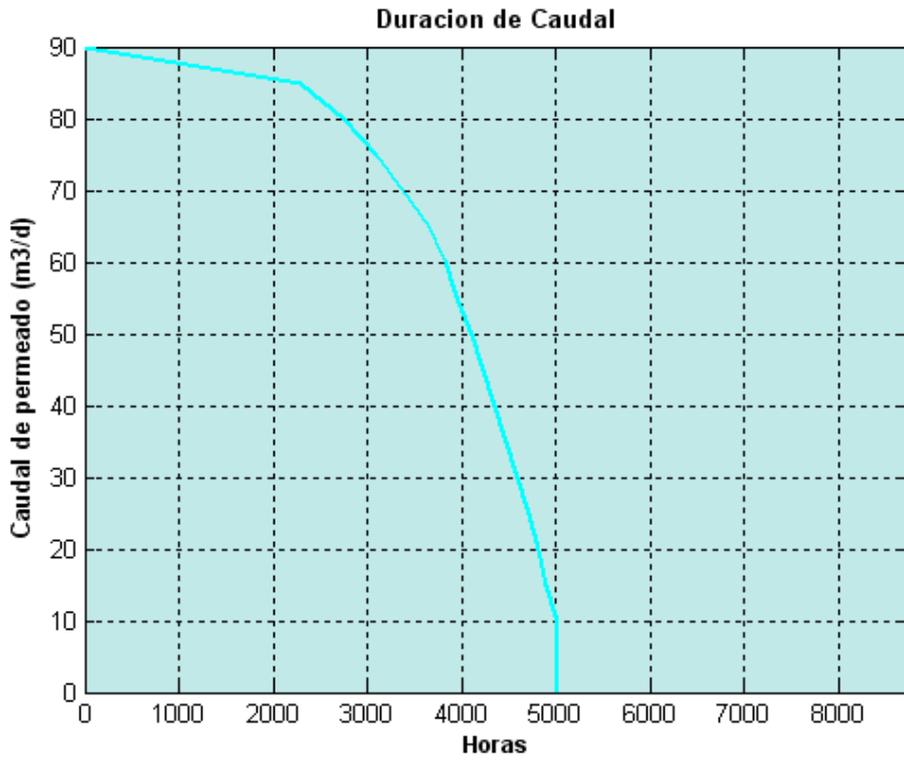


Figura 8.52: Curva de duración de caudal: Caso Práctico.

Finalmente, este funcionamiento en régimen variable, también puede ser caracterizado mediante las curvas de duración de velocidad (Figura 8.50), de potencia (Figura 8.51) y de caudal (Figura 8.52) que definen las horas equivalentes de funcionamiento para la instalación considerada.

Estudio Energético de la Planta

9.1. Análisis de la planta: Introducción

La planta objeto del estudio en este proyecto en realidad se puede equipara con el funcionamiento de una planta convencional de ósmosis inversa, con la diferencia de que para poder realizar experimentos en ella dispone de ciertos elementos que lo permiten. Estos elementos permiten simular unas condiciones de suministro de energía variable como si se tratara de una fuente de energía renovable. Los elementos imprescindibles para realizar esta simulación son el variador de velocidad y la válvula de rechazo. Con la válvula se controla la presión y con el variador de velocidad el caudal, y como la energía en el caudal de alimentación depende de estos dos parámetros, podemos variar la potencia de entrada a la planta.

La presión en el rechazo apenas varía de 1 a 3 bares con respecto a la entrada y el flujo de producto siempre está a presión atmosférica, por lo que desde la válvula de rechazo podemos modificar, aumentando o disminuyendo la presión en todo el sistema de membranas.

El variador de velocidad nos va a permitir modificar el caudal de la bomba de alta presión.

Además del variador y válvula, la planta está totalmente instrumentalizada y el conjunto está controlado por una autómatas que han permitido disponer de los datos que se han analizado. Se han tomado un total de 398.930 datos en un periodo de dos años.

9.2. Parámetros de operación de la planta de ósmosis inversa

Con los sensores disponibles en la planta, se han podido obtener los valores de:

- Presión de entrada a la membrana
- Caudal rechazo
- Caudal producto
- Conductividad producto
- Conductividad rechazo
- Presión de rechazo

9.2.1. Estado transitorio

Existen periodos de tiempo durante el proceso, a intervalos de un segundo, en los que los valores obtenidos no son válidos de cara a obtener el caudal producto deseado o simplemente son incongruentes. Esto se hace evidente al observar que los valores de recuperación que se obtienen son demasiado pequeños, además de que este tipo de valores implican conductividades negativas, que son valores imposibles.

En la tabla 9.1, podemos ver una muestra de un estado transitorio. Los primeros valores de la presión no son válidos puesto que son menores que la presión osmótica y a partir de 27 bares continua el estado transitorio mientras no se estabiliza el valor de la presión. Vemos como al estabilizarse la presión, la recuperación empieza a tomar valores aceptables para el proceso.

Un estado transitorio suele ocurrir preferentemente al comenzar a trabajar con la planta, después de una parada por cualquier motivo. Como sabemos, la válvula se utiliza para controlar la presión y con la bomba (variador) se controla el caudal. La válvula es mucho más lenta, por eso la presión tarda más en estabilizarse hasta alcanzar valores óptimos de trabajo.

Hora	P	Q	R	hora	P	Q	R	hora	P	Q	R
10:49:47	22	8.576	0,33	10:50:57	39	9.247	17,48	10:52:07	57	8.478	41,67
10:49:48	23	8.602	0,37	10:50:58	39	9.233	17,32	10:52:08	58	8.529	41,89
10:49:49	23	8.711	0,41	10:50:59	39	9.197	17,38	10:52:09	59	8.636	42,31
10:49:50	24	8.789	0,29	10:51:00	39	9.186	16,98	10:52:10	59	8.731	42,66
10:49:56	24	9.092	0,31	10:51:06	46	8.225	20,31	10:52:11	59	8.822	43,09
10:49:57	24	9.111	0,35	10:51:07	46	8.856	25,99	10:52:12	59	8.855	43,12
10:49:58	25	9.109	0,28	10:51:08	46	9.062	27,78	10:52:13	59	8.849	43,04
10:49:59	25	9.132	0,35	10:51:09	46	9.271	29,41	10:52:14	59	8.866	43,07
10:50:00	25	9.142	0,31	10:51:10	46	9.176	28,83	10:52:15	59	8.88	43,16
10:50:01	25	9.156	0,28	10:51:11	46	9.24	29,17	10:52:16	59	8.892	43,17
10:50:02	25	9.173	0,31	10:51:12	46	9.308	29,69	10:52:17	59	8.876	43,07
10:50:03	26	9.155	0,35	10:51:13	46	9.294	29,37	10:52:18	59	8.832	42,93
10:50:04	28	8.839	0,29	10:51:14	46	9.327	29,59	10:52:19	59	8.808	42,74
10:50:05	30	8.491	0,37	10:51:15	46	9.041	27,47	10:52:20	59	8.798	42,68
10:50:06	30	8.383	0,34	10:51:16	46	8.957	26,6	10:52:21	59	8.768	42,63
10:50:07	30	8.387	0,35	10:51:17	46	9.216	28,66	10:52:22	59	8.757	42,49
10:50:08	31	8.424	0,34	10:51:18	46	9.297	29,28	10:52:23	60	8.758	42,45
10:50:09	31	8.431	0,34	10:51:19	46	9.391	29,78	10:52:24	60	8.761	42,51
10:50:10	31	8.445	0,31	10:51:20	46	9.115	27,87	10:52:25	60	8.784	42,47
10:50:11	31	8.474	0,37	10:51:21	46	8.937	26,28	10:52:26	60	8.836	42,65
10:50:32	32	8.495	0,34	10:51:22	46	8.953	26,27	10:52:27	60	8.842	42,69
10:50:33	35	8.171	0,39	10:51:23	46	8.97	26,67	10:52:28	60	8.849	42,71
10:50:34	37	7.713	0,33	10:51:24	46	9.23	28,77	10:52:29	60	8.869	42,75
10:50:35	37	7.568	0,34	10:51:25	46	9.267	29,02	10:52:30	60	8.876	42,76
10:50:36	37	7.543	0,42	10:51:26	46	9.149	28,33	10:52:31	60	8.892	42,75
10:50:37	37	7.52	0,29	10:51:27	46	9.246	28,97	10:52:32	60	8.903	42,89
10:50:38	37	7.554	0,42	10:51:28	46	9.068	27,58	10:52:33	60	8.896	42,85
10:50:39	37	7.557	0,42	10:51:29	47	9.122	28,04	10:52:34	61	8.92	42,85
10:50:40	38	7.557	0,42	10:51:30	46	9.085	27,71	10:52:35	61	8.913	42,84
10:50:41	38	7.577	0,42	10:51:31	47	8.964	29,77	10:52:36	61	8.903	42,86
10:50:42	38	7.561	0,34	10:51:32	47	8.967	26,87	10:52:37	61	8.924	42,83

Tabla 9.1 Datos del estado transitorio.

9.2.2. Presión y caudal

Un parámetro fundamental que define las condiciones de operación de una planta de ósmosis inversa es la presión de trabajo. La presión debe ser superior a la presión osmótica de la solución de aporte, ya que esa presión osmótica es la fuerza que tenemos que vencer para obtener el caudal de agua producto. Esta condición de ser superior se debe, por un lado, a los fenómenos de polarización de la membrana, y por otro, al aumento de la concentración que se produce a medida que se va generando permeado. Por tanto, el valor de la presión de trabajo estará condicionado por la salinidad de la solución a tratar.

La polarización de la membrana produce una serie de efectos, de acuerdo con las ecuaciones de transporte:

- Reduce, a presión constante, el flujo de solvente y, por tanto, el caudal de permeado ya que, al aumentar la concentración en la superficie aumenta la presión osmótica disminuyendo la presión a través de la membrana.
- Aumenta el flujo de soluto a través de la membrana y la concentración del permeado al aumentar el gradiente de concentraciones.
- Aumenta el riesgo de precipitación sobre la superficie de la membrana.

El caudal de producto, a través de la membrana es proporcional a la presión diferencial neta a través de la misma. El caudal de sal no está afectado por la presión aplicada, sino que es proporcional a la diferencia de concentración, aunque sí tiene efecto en un sentido indirecto, sin embargo, la presión sí tiene efecto sobre el rendimiento de retención.

A bajas presiones de trabajo, el caudal de agua resultante es menor mientras que el caudal de sal permanece a nivel constante.

Fijándonos en el porcentaje de recuperación,

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} * 100,$$

observamos que los mayores niveles de concentración salina en la corriente de alimentación aumentan la presión osmótica, lo que reduce la presión neta y, por otro lado, el caudal de producto.

A continuación se representa gráficamente los valores de presión y caudal total, es decir, caudal producto más caudal rechazo, correspondientes a la planta, así se pueden observar los límites de trabajo a los que está condicionado el proceso:

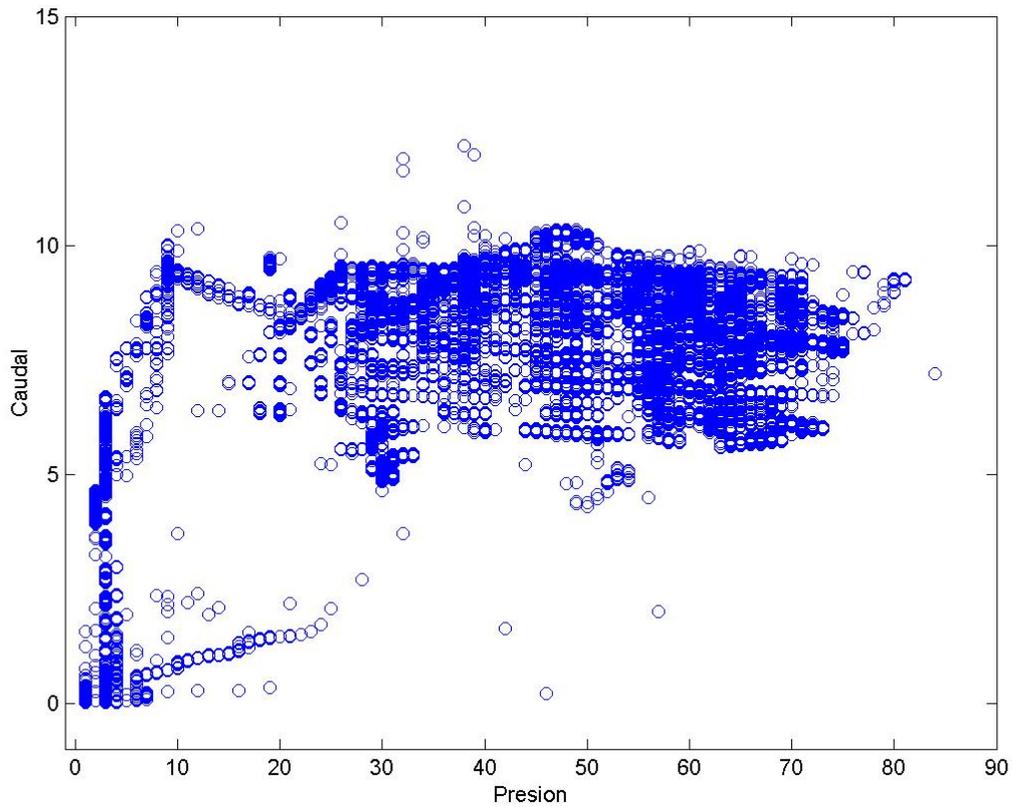


Figura 9.1 Presión (bar) frente a Caudal (m³/hora)

Ésta gráfica representa el conjunto de datos obtenidos en la medición pero que no son totalmente válidos. Para limitar los valores de presión y caudal dentro de los cuales trabaja la planta debemos tener en cuenta que éstos dependen de la calidad del agua que vamos a obtener y de las características de la membrana.

La presión está limitada, por una parte por el hecho de que la presión osmótica del agua es de aproximadamente 27 bares, por lo que valores menores no tendrían sentido. Por otro lado, la presión máxima a la que puede operar la membrana de la planta es de 82 bares. En función de esto, los valores de caudal que se obtienen en total están comprendidos entre 5 y 10 m³/hora.

Los valores obtenidos que están fuera del rango que se ha deducido puede ser debido a diferencias del sensor de presiones y el de caudal, o forman parte de un estado transitorio o debido a una saturación temporal.

Por lo tanto, los límites de trabajo de la planta representados sobre la nube de puntos global que se han medido, son los indicados en la figura 9.2.

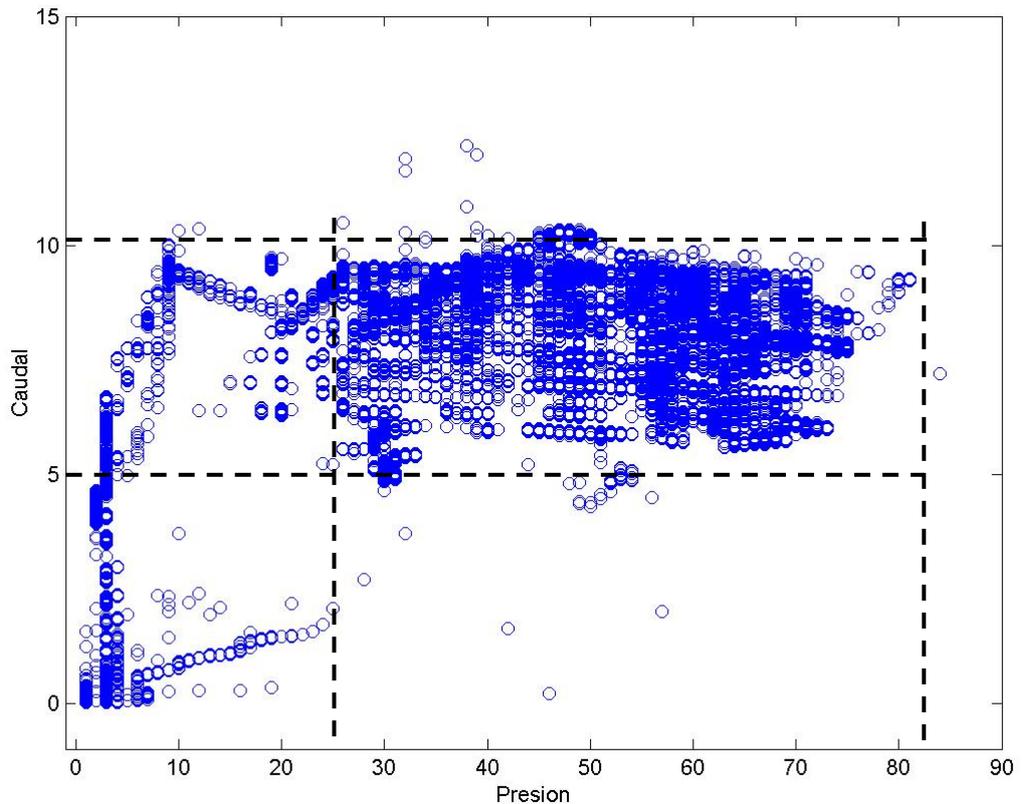


Figura 9.2 Límites de Presión (bar) frente a Caudal (m³/hora)

9.2.3. Conductividad

Existe una relación directa entre TDS (ppm) y conductividad y también se verá que la medida de la conductividad es importante para poder controlar el tipo de agua con que se está trabajando, y además para asegurar que el punto de diseño de la planta y del pretratamiento sean correctos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece que la calidad de cualquier agua destinada a un consumo o abastecimiento humano no debe superar los 500 ppm. De cualquier forma, en España el agua para consumo humano deberá cumplir el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, en donde se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

9.2.4. Caudal de Rechazo

El objetivo fundamental de la ósmosis inversa es obtener la calidad de agua más pura que se pueda a un costo lo más bajo posible. Sin embargo, no existe membrana perfecta que logre efectuar un rechazo de sales del 100% y que, a la vez, tenga un buen flujo de agua producto. Es obvio que, mientras más alto sea el rechazo de sales, mejor es la calidad del producto. Por

eso es importante utilizar la membrana que tenga mayor rechazo de sales a un costo razonable. Con la membrana de la planta se obtiene un rechazo del 99.8%.

Anteriormente se dijo que el caudal de sal no está afectado por la presión aplicada, sino que es proporcional a la diferencia de concentración, sin embargo, en un sentido indirecto, la presión sí tiene efecto sobre el rendimiento de retención.

A bajas presiones de trabajo, el caudal de agua resultante es menor mientras que el caudal de sal permanece a nivel constante. El efecto neto es que la concentración de sal en el permeado aumenta debido a la menor tasa de dilución del permeado.

El factor de recuperación,

$$r = \frac{Q_p}{Q_a} * 100,$$

tiene un efecto sobre el rendimiento de la membrana, ya que afecta a ambos caudales: sal y producto. A medida que la conversión aumenta, la concentración de sal en la corriente de alimentación se incrementa, lo que produce un incremento en la fuerza actuante sobre el flujo o paso de sal. Además, los mayores niveles de concentración salina en la corriente de alimentación aumentan la presión osmótica, lo que reduce la fuerza actuante o presión neta y, por otro lado, el caudal de producto.

El factor de concentración, por otra parte se puede relacionar con la conversión mediante:

$$CF = \left[\frac{1}{1-r} \right]$$

Esta expresión significa que la concentración de un soluto en la corriente de alimentación será doble (si se asume 100 por 100 de retención), si la planta trabaja a una recuperación del 50 por 100 (es decir, $r = 0,5$)

➤ **Presión frente a caudal producto**

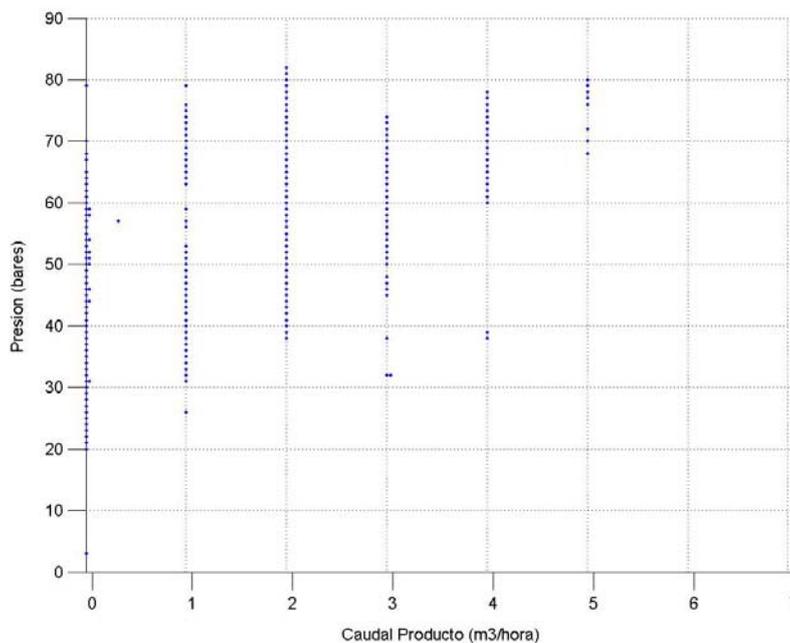


Figura 9.3 Presión (bar) frente a Caudal (m³/hora) dentro límites

Se observa la tendencia creciente del caudal producto al aumentar la presión, y que además, para obtener un buen caudal producto debe ser a partir de unas determinadas presiones.

➤ **Caudal producto frente a recuperación**

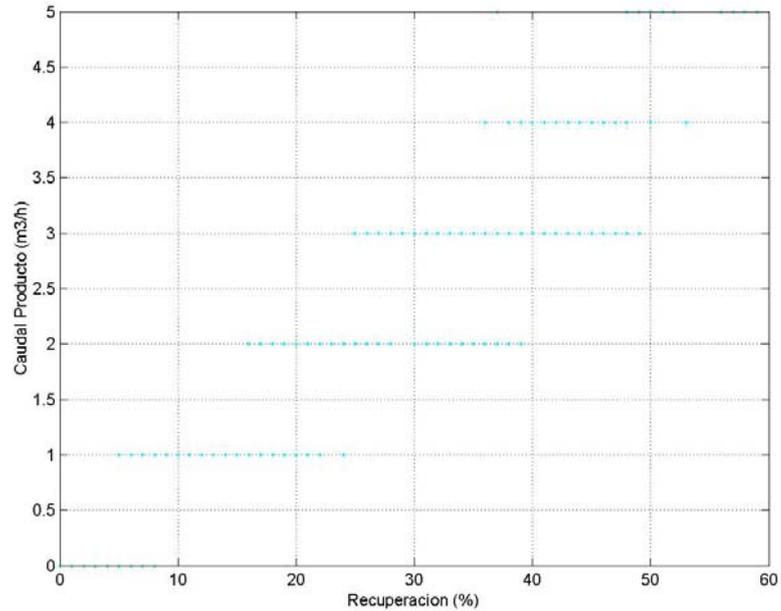


Figura 9.4 Caudal (m³/hora) frente a recuperación

La recuperación es directamente proporcional al caudal producto, al aumentar el caudal producto, aumenta la recuperación, es decir, la cantidad de agua producto a partir del agua de alimentación.

➤ **Presión frente a recuperación**

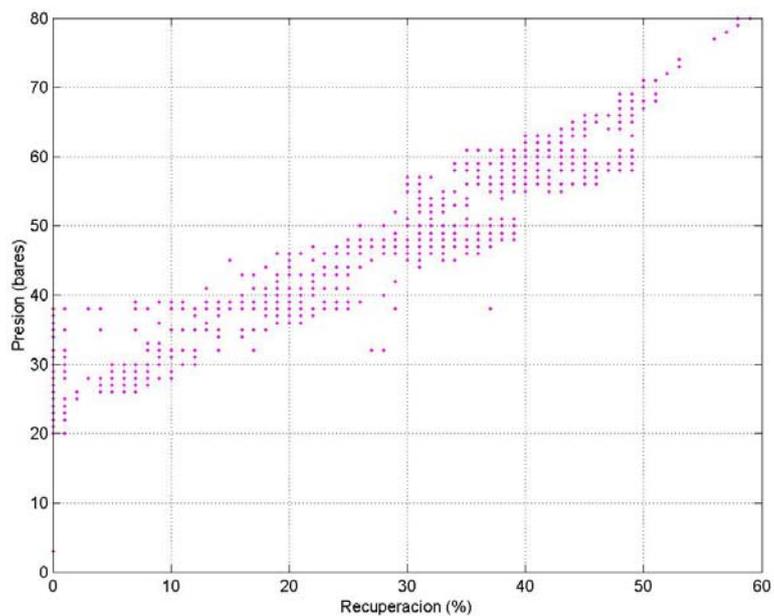


Figura 9.5 Presión (bar) frente a recuperación

Según la figura de la gráfica 9.5, para conseguir un buen caudal producto se debe trabajar a una presión determinada. Como la recuperación está directamente relacionada con el caudal producto, a mayor caudal producto, mayor porcentaje de recuperación, es evidente que a mayor presión, mayor recuperación.

➤ **Conductividad producto**

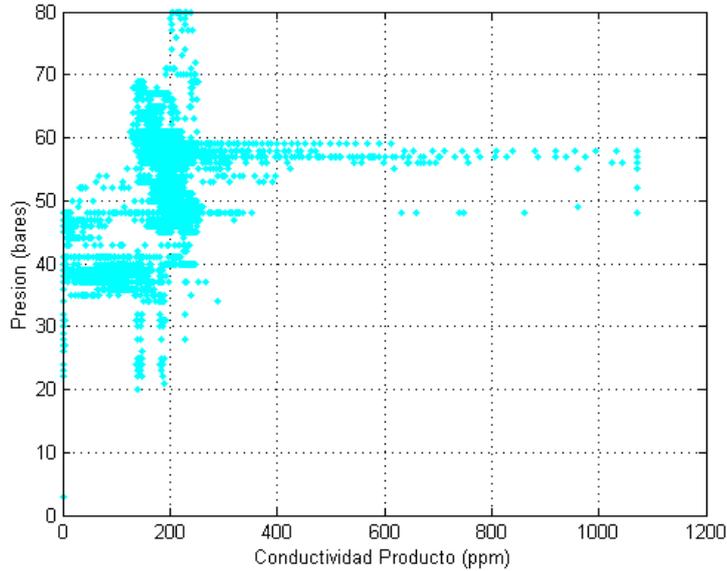


Figura 9.6 Presión (bar) frente a conductividad

En la grafica de la figura 9.6, se muestra la calidad del agua que se está obteniendo en la planta, en ppm, es decir, la conductividad del producto. El intervalo de valores, para unos niveles aceptables de presión y caudal producto se encuentra entre 100 y 400 ppm.

➤ **Conductividad de rechazo frente a recuperación**

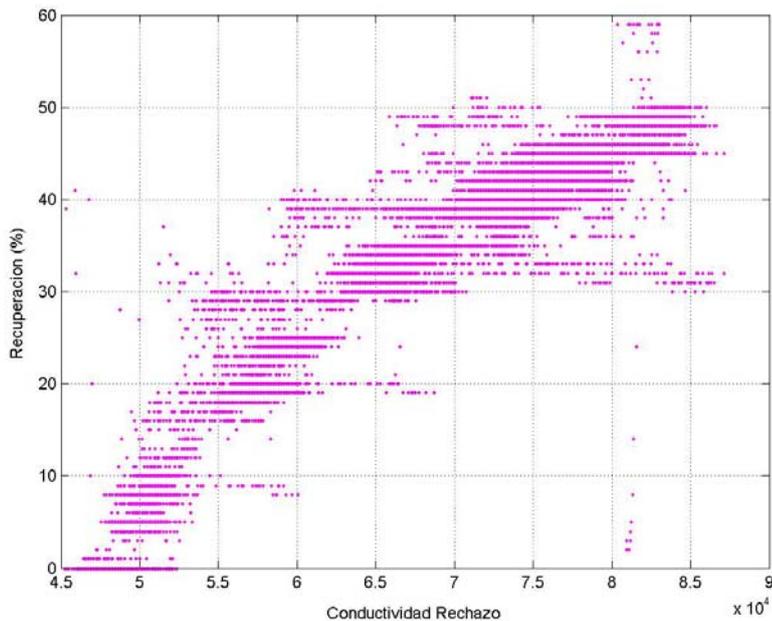


Figura 9.7 Recuperación frente a Caudal (m³/hora)

En la grafica de la figura 9.7 se puede apreciar, además del rango de valores de la conductividad del rechazo, cómo al aumentar la recuperación aumenta la conductividad en el rechazo, puesto que se está obteniendo un caudal de producto mayor en proporción al caudal de alimentación.

➤ **Potencia frente a presión de alimentación y caudal producto**

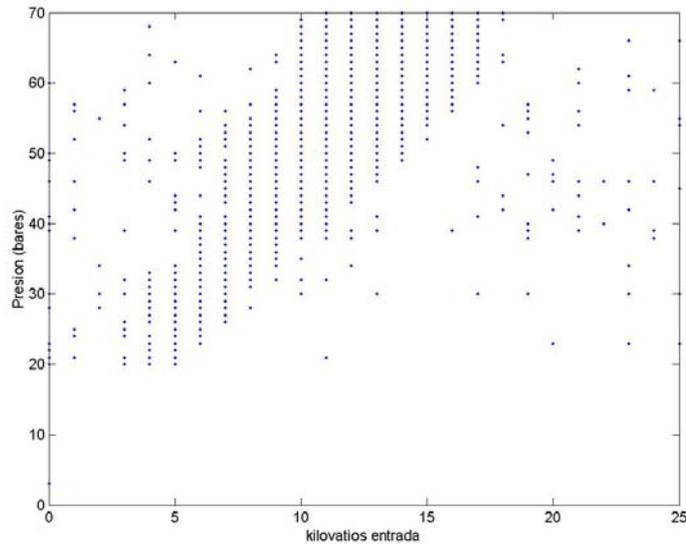


Figura 9.8 Presión (bar) frente a potencia

La energía necesaria para el proceso, como podemos ver en las dos gráficas 9.8 y 9.9, está en función del caudal de alimentación y de la presión que obtenemos de la bomba de alta, por lo que cómo es evidente, a mayor presión, mayor gasto energético. También aumenta el gasto al aumentar el caudal producto, puesto que está relacionado con el aumento de presión y de caudal de alimentación.

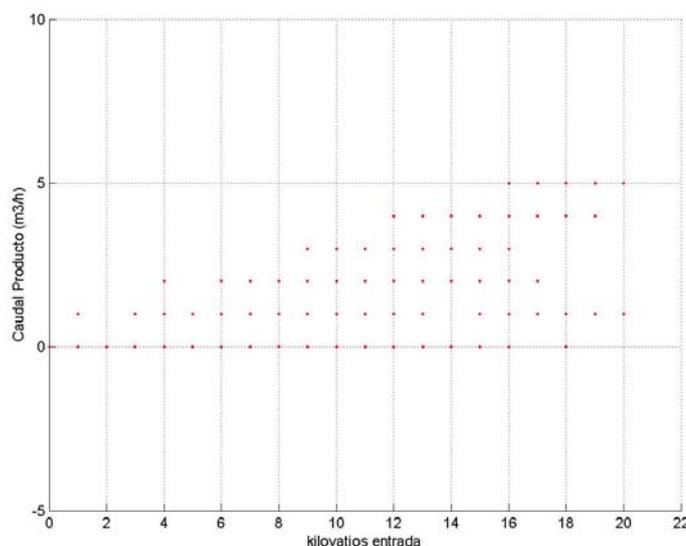


Figura 9.9 Caudal (m³/hora) frente a potencia

9.3. Coeficiente de transferencia de masa

El coeficiente de transferencia de masa o de permeabilidad al solvente es el volumen de solvente que atraviesa la membrana por unidad de superficie, unidad de tiempo y unidad de presión a temperatura y salinidad determinadas y constantes.

El coeficiente de permeabilidad depende de la presión de operación, de la temperatura, del estado de compactación de la membrana, de su factor de polarización y del grado de ensuciamiento.

El caudal de agua producto (Q_p) a través de una membrana semipermeable viene dado por la ecuación:

$$Q_p = k_w (\Delta P - \Delta \pi)$$

k_w = Coeficiente de transferencia de masa o permeabilidad

ΔP = Diferencia de presión hidrostática a través de la membrana

$\Delta \pi$ = Diferencia de presión osmótica

$(\Delta P - \Delta \pi)$ = Presión neta aplicada

al término k_w se lo denomina "permeabilidad del solvente" y dependerá de la naturaleza química de la membrana. Además, el flujo se ve tanto más dificultado cuanto mayor sea el espesor de la membrana.

Existen expresiones teóricas que en principio deberían permitir hallar k_w en función de otros parámetros más fundamentales como el coeficiente de difusión del solvente en la membrana. Normalmente se considera que tales ecuaciones son de poca utilidad debido a que dichos parámetros difícilmente pueden ser calculados a priori ni tampoco pueden ser hallados de forma independiente a la permeabilidad k_w . De todos modos, parece claro que el paso de solvente a través de la membrana será tanto mayor cuanto mayor sea el coeficiente de difusión de éste en aquella. También se deduce a partir de estas expresiones teóricas que el flujo de disolvente será tanto más grande cuanto mayor sea la solubilidad del solvente en dicha membrana.

El planteamiento a la hora del diseño de una planta de ósmosis inversa consiste en lo siguiente:

Conociendo los parámetros:

- permeabilidad del disolvente
- permeabilidad del soluto
- caudal de alimentación
- concentración de soluto en el alimento

Imponiendo:

- caudal de perneado
- concentración de soluto en el producto

Se halla:

- presión de trabajo
- superficie de la membrana
- caudal de rechazo
- concentración en el rechazo

Pueden haber otras formulaciones del problema (p.ej. imponer caudales y concentraciones en el rechazo) y hallar el caudal y concentraciones en el producto, pero lo más habitual va a ser utilizar las condiciones expuestas. Para hallar esos parámetros se recurren a las diversas ecuaciones que se han estudiado en temas anteriores. Al aplicar las ecuaciones, normalmente se supone que los coeficientes de permeabilidad son conocidos. De hecho, las permeabilidades podrían ser calculadas a partir de ecuaciones teóricas, pero como ya se ha dicho, para ello se precisan de datos experimentales difíciles de obtener o para cuya obtención podríamos ya disponer directamente de los valores de permeabilidad. Así, k_w podría ser obtenido utilizando disolvente puro y haciéndolo permear a diferentes presiones a través de la membrana. Teóricamente el flujo de producto debe ser proporcional a la sección de la membrana y al gradiente de presiones a la que está sometida la membrana la constante de proporcionalidad es la permeabilidad. Es por esto que, lo normal es tomar el coeficiente de permeabilidad al solvente de la literatura técnica para una membrana.

A partir de los datos experimentales recogidos en la planta, se puede observar el comportamiento real de este coeficiente.

Como dijimos, existen muchos modelos y teorías diferentes que describen la transferencia de masa en los procesos de difusión controlada en membranas.

Las ecuaciones básicas utilizadas para desarrollar los modelos se muestran a continuación:

$$J = k_w(\Delta P - \Delta \Pi) = \frac{Q_p}{A}$$

$$J_i = k_i \Delta C = \frac{Q_p C_p}{A}$$

$$r = \frac{Q_p}{Q_f}$$

$$Q_f = Q_c + Q_p$$

$$Q_f C_f = Q_c C_c + Q_p C_p$$

Donde,

J = caudal de agua, L^3/L^2t

J_i = caudal de soluto, M/L^2t

K_w = coeficiente de transferencia de masa del solvente o de permeabilidad, L^2t/M

K_i = coeficiente de transferencia de masa del soluto, L/t

ΔP = gradiente de presión, L , $[(P_f+P_c)/2-P_p]$

$\Delta \Pi$ = presión osmótica, L , $[(\pi_f + \pi_c)/2-\pi_p]$

ΔC = gradiente de concentración, M/L^3 , $[(C_f + C_c)/2 - C_p]$

Q_f = caudal de la corriente de alimentación, L^3/t

Q_c = caudal de la corriente de concentrado, L^3/t

Q_p = caudal de la corriente de permeado, L^3/t

C_f = concentración de soluto en corriente de alimentación, M/L^3

C_c = concentración de soluto en corriente de concentrado, M/L^3

Para calcular el valor del coeficiente de permeabilidad de la planta, se utilizan las expresiones anteriores. Partimos, en primer lugar, de la igualdad de caudales, es decir:

$$Q_{\text{alimentación}} = Q_{\text{rechazo}} + Q_{\text{producto}}$$

y como las conductividades de rechazo y del producto, son datos obtenidos en la planta, se calcula el valor de la conductividad de alimentación. De esta forma, ya se puede obtener el valor de la presión osmótica. Para ello, vamos a utilizar una expresión con la que puede obtener una estimación del gradiente de presión osmótica a partir del STD del sistema influente, corrientes de rechazo y permeado:

$$\Delta \pi_{\text{sis}} = \left[\left(\frac{TDS_{\text{aliment.}} + TDS_{\text{rechazo}}}{2} \right) - TDS_{\text{producto}} \right] * 0.01$$

El valor 0,01 es un factor de aproximación para convertir TDS en presión. En lugar de utilizar el valor de TDS se utiliza un valor proporcional de la conductividad, según la explicación siguiente,

La salinidad se expresa como residuo seco a 105 °C o TDS (Sólidos Totales Disueltos), y se mide normalmente en mg/l o ppm.

Como la determinación de la salinidad es lenta y se requiere una muestra del agua a tratar, en muchos procesos industriales se precisa tener un control instantáneo del proceso. Esto hace que en lugar de establecerse la salinidad del agua, se determine la conductividad eléctrica, dado que este parámetro sí se puede medir de una forma rápida y bastante precisa "in situ". La conductividad eléctrica (CE) es la facilidad o habilidad que tiene una sustancia para conducir la corriente eléctrica.

Un agua químicamente pura no conduce la corriente, pero a medida que se van disolviendo en ella distintos elementos se va haciendo conductora.

Pero la conductividad eléctrica de un agua determinado no es un parámetro constante sino que depende de la temperatura, aumentando su valor al hacerlo ésta. También es necesario saber que, a medida que aumenta la conductividad de un agua, lo hace su poder de corrosión. Como unidad de conductividad se utiliza el S/cm (Siemens/cm), aunque como esta unidad es muy grande, se suele expresar en sub-unidades más pequeñas tales como el mS/cm o incluso en $\mu\text{S/cm}$.

Lógicamente existe una relación entre la conductividad eléctrica y la salinidad, lo que permite el paso inmediato de una a otra unidad, aunque dicha relación no sea rigurosamente fija y exacta. En un agua natural, por ejemplo, el coeficiente de paso aproximado entre una y otra magnitud es de 0,64 o múltiplos de este valor:

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE } (\mu\text{S/cm}) \times 0,64$$

Pero esta relación es algo distinta en otros tipos de aguas, en función de la composición química de éstas. Así por ejemplo, en las aguas desaladas por ósmosis inversa, como dichas aguas contienen más sodio y cloruros que calcio, magnesio y sulfatos, las concentraciones de aquellos suelen ser de 2,13 y 2,14 $\mu\text{S/cm}$. Por esta razón, de forma aproximada puede obtenerse que:

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{CE } (\mu\text{S/cm}) \times 0,51$$

La salinidad total y el contenido de sales concretas de un agua mar es menos variable que el de un agua salobre (aguas superficiales, subterráneas, ríos o lagos).

Se estima que la salinidad media del agua de mar está en torno a los 35.000 ppm con una presión osmótica $\Pi \approx 385 \text{ ppm}$ (lo que establece una relación aproximada de 100 ppm = 1 psi). O también la relación aproximada de 1000 ppm = 11 psi de presión osmótica

En resumen, se calcula el valor de la presión osmótica según,

$$\Delta\pi = \left(\frac{C_{aliment.} + C_{rechazo}}{2} - C_{producto} \right)$$

Ahora ya se puede calcular el valor del coeficiente de permeabilidad, ya que podemos deducir:

$$k_w = \frac{Q_{producto}}{A(\Delta P - \Delta\pi)}$$

El valor del gradiente de presión osmótica se ha explicado cómo se obtiene, el caudal producto es un dato obtenido en la planta igual que el valor de la presión, y el área de la membrana es un dato del fabricante y su valor es de 27,9 m². Se ha calculado el valor de coeficiente para todos los puntos de la planta y se obtiene la gráfica de la figura 9.10, donde se ve el comportamiento de dicho coeficiente frente a la presión.

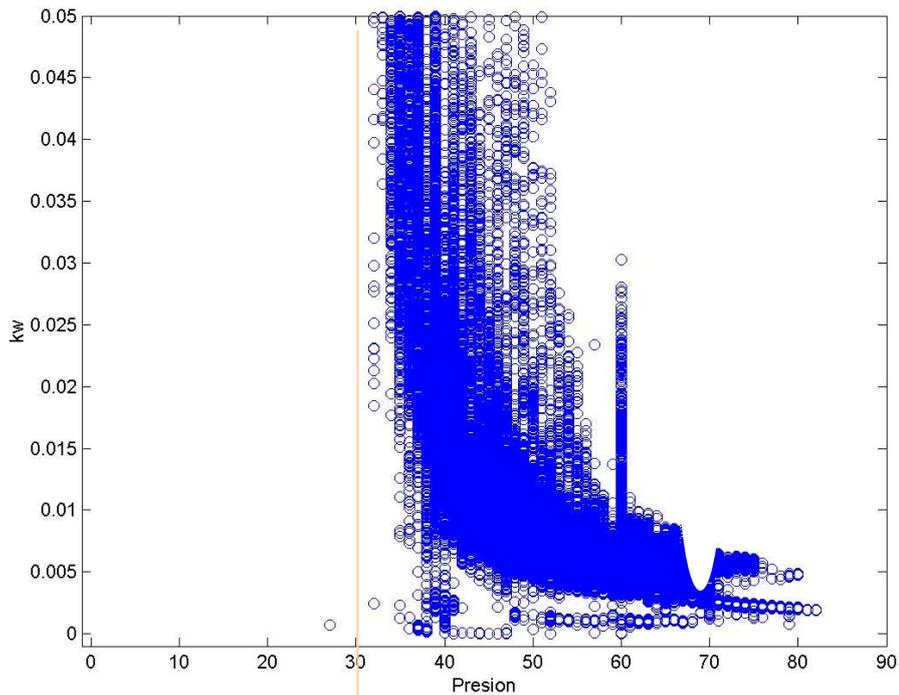


Figura 9.10 Coeficiente de permeabilidad frente a Presión (bares)

De manera más específica, utilizando valores promedio, podemos ver la tendencia del coeficiente. Para presiones menores de 41 o 42 bares, el comportamiento es muy variable. A partir de estas presiones empieza a estabilizarse un poco, aunque sigue siendo variable en un intervalo de valores que oscila entre 0.0185 y 0.006 m²/h.bar. Entre 58 y 63 bares se puede considerar que permanece practicante constante, en torno a 0.065 m²/h.bar, para luego, a partir de 64 bares disminuir ligeramente a 0.05 m²/h.bar.

Se comprueba que este es el comportamiento de esta membrana en las condiciones de operación, por lo que a la hora de diseñar la planta ya conocemos el valor del coeficiente de permeabilidad al solvente. Otro tipo de membrana tendrá su propio comportamiento.

9.4 Energía en el proceso de ósmosis inversa

Teniendo en cuenta que la energía, y más concretamente lo que cuesta, es una de las preocupaciones más importantes de cualquier planta desaladora, y más aún de una planta que está enfocada para su uso con energía renovable, es vital dentro del estudio, saber la energía que se necesita para obtener el producto que buscamos, o dicho de otra forma, cuánta energía se necesita por cada m³ de agua producto que obtenemos en la planta, y saber qué ocurre con esa energía después del proceso de ósmosis. Para ello, se va a analizar cada situación del proceso, alimentación, caudal producto y caudal rechazo. Así podremos determinar la forma más óptima de trabajo

➤ **Caudal de alimentación**

Para llevar a cabo el proceso de ósmosis y obtener el agua producto, es necesario disponer de una energía de entrada, que es la energía que consume la bomba, para poder obtener la presión necesaria para que se produzca el fenómeno de ósmosis. Por lo tanto, a la entrada tendremos únicamente energía cinética característica del propio movimiento del agua. Los valores de esta energía, en kWhora, se calculan como producto de presión y caudal de entrada. Así también podemos saber la energía necesaria para producir cada m³ de agua producto en la planta. Es necesario disponer de entre 4,8 y 4,1 kWhora por cada m³ de agua producto que se obtiene, para un rango de presiones comprendido entre 40 y 70 bares.

➤ **Caudal de agua producto**

En el proceso de obtención del agua producto, la energía que entra en juego ya no es la misma que la necesaria en el caudal de alimentación. La energía cinética del flujo de agua producto es casi despreciable y del orden de $0,0281 \frac{\text{kWhora}}{\text{m}^3}$.

Sin embargo, existe una energía química, debido al cambio de conductividades, pasando de la conductividad propia del agua de mar a una conductividad dentro de los límites que hemos especificado. El valor de esta energía se calcula con la expresión de Van't Hoff, que se dedujo en temas anteriores. Esta ecuación relaciona la presión osmótica con la concentración, de la siguiente forma:

$$P_s = c * R * T$$

donde,

P_s = presión osmótica

c = concentración ión molar

R = constate = $0,082 \frac{\text{litros} * \text{bar}}{\text{°} * \text{mol}}$

T = temperatura = $273 + 27 = 300 \text{ K}$

Si suponemos que la cantidad de sal en el agua es de $32 \frac{\text{gramos}}{\text{litro}}$, y que se trata de NaCl. El peso molecular del compuesto es 58,5 gramos, por lo que el número de moles en agua de mar

sería, $\frac{32 \frac{\text{gramos}}{\text{litro}}}{58,5 \text{ gramos}} = 0,546 \frac{\text{mol}}{\text{litro}}$. Como el agua se disuelve en dos iones, tenemos que $c =$

$0,546 * 2 = 1,1 \frac{\text{mol}}{\text{litro}}$.

Sustituyendo en la ecuación de Van't Hoff, obtenemos que la presión osmótica, P_s , tiene un valor de 27 bares, que haciendo un cambio de unidades, corresponden a $0,75 \frac{\text{kWhora}}{\text{m}^3}$ por

cada m^3 de agua producto. Entonces la energía almacenada en el agua producto es la diferencia de presión osmótica, entre agua producto y de alimentación.

$$\Delta P = (c_{\text{agua mar}} - c_{\text{agua producto}}) * R * T$$

Aplicando esta expresión a los datos de la planta, se obtiene que la energía es del orden de $0,73-0,75 \frac{\text{kWhora}}{m^3}$ para todo el rango de presiones.

Por lo tanto, la energía contenida en el flujo de agua producto, oscila entre 0,76 y 0,78 kWhora por cada m^3 de agua que se obtiene. Podemos decir, con otras palabras, que se necesita ese valor de energía para vencer la presión osmótica y poder pasar de la entrada a la salida del producto.

➤ **Caudal de agua rechazo**

Finalmente, podemos saber la energía presente en el caudal de rechazo por cada m^3 de agua producto. En este caso, están presentes las dos energías de las que hemos hablado.

Existe una energía cinética debido al propio movimiento del agua, que en este caso no es despreciable, puesto que el valor de la presión del caudal de rechazo está entre 1 y 3 bares menos que la del caudal de alimentación. Por lo tanto, la energía cinética es el producto del caudal de rechazo por su presión correspondiente, y su valor está comprendido entre 3,6 y 2,1

$\frac{\text{kWhora}}{m^3}$. Si se quiere pasar del rechazo a la entrada habría que inyectar energía debido a que ésta tiene menor presión.

En este caso la conductividad aumenta con respecto al caudal de alimentación, al contrario que lo que ocurre con el caudal de producto. La energía química contenida en el rechazo se halla de la misma forma que con el producto, con la ecuación de Van't Hoff, pero aplicando la expresión a los datos correspondientes al rechazo. Por cada m^3 de agua producto, hay una energía

química cuyo valor oscila entre 3 y $1 \frac{\text{kWhora}}{m^3}$.

Por lo tanto, la energía existente en el caudal de rechazo por cada m^3 de agua que se obtiene en la planta, tiene un valor total 3,9 a $3,1 \frac{\text{kWhora}}{m^3}$ para todo el rango de presiones.

En la tabla 9.2 podemos ver la energía que necesitaríamos para cada una de las situaciones, es decir, el gasto en energía que tendríamos que tener, a qué presión y caudal de entrada corresponde, qué producto se obtiene, cuál es la recuperación, la conductividad, y los kWhora por cada m^3 de producto.

kWh	Pentrada (bares)	Qentrada (m ³ /h)	Qp(m ³ /h)	Recuperación(%)	kWh/m ³	Crechazo
8,97	38	8,50	1,50	17,65	5,98	56445
9,63	38,5	9,00	2,00	22,22	4,81	55510
9,26	39,2	8,50	1,50	17,65	6,17	52762
9,85	39,4	9,00	2,00	22,22	4,93	59220
10,23	39,8	9,25	2,50	27,03	4,09	54260
9,44	40	8,50	1,50	17,65	6,30	53580
10,04	40,4	8,95	1,90	21,23	5,29	56020
10,65	40,8	9,40	2,80	29,79	3,80	57360
9,68	41	8,50	1,50	17,65	6,45	56960
10,44	41,3	9,10	2,20	24,18	4,75	56714
10,88	41,9	9,35	2,70	28,88	4,03	55780
10,22	42,3	8,70	1,70	19,54	6,01	54120
10,77	42,6	9,10	2,20	24,18	4,89	58300
11,02	42,9	9,25	2,55	27,57	4,32	65000
10,52	43,3	8,75	1,75	20,00	6,01	54120
11,02	43,6	9,10	2,20	24,18	5,01	58300
11,34	43,9	9,30	2,60	27,96	4,36	64860
10,56	44,2	8,60	1,60	18,60	6,60	51900
11,25	44,5	9,10	2,20	24,18	5,11	59180
11,76	44,8	9,45	2,90	30,69	4,06	52380
10,88	45	8,70	1,70	19,54	6,40	67220
11,60	45,3	9,22	2,40	26,03	4,83	52580
11,78	45,6	9,30	2,65	28,49	4,45	52800
12,18	45,9	9,55	3,20	33,51	3,81	51300
10,97	46,2	8,55	1,56	18,21	7,05	54860
11,54	46,4	8,95	1,99	22,18	5,81	68960
12,17	46,6	9,40	2,75	29,22	4,43	54540
12,36	46,8	9,51	3,01	31,68	4,10	53660
12,51	46,9	9,60	3,40	35,46	3,67	55680
11,90	47,3	9,06	2,12	23,43	5,61	54200
12,36	47,6	9,35	2,70	28,88	4,58	66049
12,71	47,9	9,55	3,20	33,51	3,97	55750
12,16	48	9,12	2,24	24,57	5,43	57700
12,44	48,4	9,25	2,50	27,03	4,97	57640
12,81	48,8	9,45	2,90	30,69	4,42	61277
12,60	49	9,26	2,50	27,00	5,04	70920
13,10	49,5	9,53	3,04	31,90	4,31	66200
12,83	50	9,24	2,50	27,06	5,13	71391
13,33	50,4	9,52	3,01	31,62	4,43	63100
12,94	50,8	9,17	3,35	36,53	3,86	62080
13,22	51	9,33	2,64	28,30	5,01	71800
13,62	51,4	9,54	3,05	31,94	4,47	63500
13,86	51,8	9,63	3,31	34,37	4,19	64980
13,80	52,4	9,48	2,99	31,54	4,61	59180
14,04	52,8	9,57	3,15	32,92	4,46	78400
14,06	53	9,55	3,03	31,76	4,64	82720
14,25	53,5	9,59	3,18	33,18	4,48	66140
14,13	54	9,42	2,97	31,49	4,76	85220
14,56	54,5	9,62	3,30	34,30	4,41	67120

kWh	Pentrada (bares)	Qentrada (m ³ /h)	Qp(m ³ /h)	Recuperación(%)	kWh/m ³	Crechazo
14,59	55,3	9,50	3,00	31,58	4,86	78429
15,06	55,6	9,75	3,51	36,02	4,29	59520
15,29	55,9	9,85	3,72	37,75	4,11	59520
14,41	56,2	9,23	2,46	26,62	5,86	79140
14,90	56,4	9,51	3,00	31,55	4,97	76970
15,31	56,6	9,74	3,50	35,88	4,38	74300
15,62	56,8	9,90	3,84	38,82	4,06	60940
14,65	57	9,25	2,55	27,51	5,75	78820
15,08	57,2	9,49	3,00	31,61	5,03	82860
15,56	57,4	9,76	3,55	36,37	4,38	68673
15,87	57,6	9,92	3,88	39,07	4,09	61000
15,53	58	9,64	3,35	34,75	4,64	74656
16,02	58,5	9,86	3,70	37,53	4,33	61480
15,75	59	9,61	3,10	32,26	5,08	83134
16,25	59,4	9,85	3,66	37,16	4,44	74063
16,53	59,8	9,95	3,90	39,20	4,24	78940
16,06	60,3	9,59	3,10	32,33	5,18	79760
16,50	60,6	9,80	3,60	36,73	4,58	79620
16,90	60,9	9,99	4,10	41,06	4,12	76040
16,32	61	9,63	3,35	34,76	4,88	80960
15,98	61,4	9,37	3,70	39,48	4,32	72871
17,13	61,8	9,98	4,00	40,06	4,29	71520
17,00	62	9,87	3,72	37,70	4,57	70240
17,29	62,5	9,96	3,90	39,16	4,43	74938
17,38	63	9,93	3,35	33,74	5,19	70920
17,44	63,3	9,92	3,88	39,11	4,50	76520
17,68	63,6	10,01	4,35	43,46	4,07	71260
17,74	64	9,98	4,05	40,53	4,39	74500
17,74	64,5	9,90	4,46	45,05	3,98	67620
18,04	65	9,99	4,14	41,47	4,35	75640
18,11	65,5	9,96	4,53	45,51	4,00	68900
18,29	66	9,98	3,93	39,37	4,66	71520
18,37	66,5	9,95	4,48	45,02	4,10	81980
18,53	67	9,96	4,50	45,23	4,11	68760
18,81	68	9,96	4,48	44,96	4,20	71400
18,94	68,4	9,97	4,56	45,78	4,15	69900
19,07	68,8	9,98	4,67	46,78	4,09	71660
19,15	69	9,99	4,74	47,41	4,04	71600
19,42	70	9,99	4,71	47,13	4,13	71660
19,69	71	9,98	4,67	46,80	4,21	74960
19,80	71,5	9,97	4,93	49,44	4,02	82860
19,96	72	9,98	4,95	49,60	4,03	82260
20,24	73	9,98	4,97	49,80	4,07	82260
20,54	74	9,99	4,99	49,95	4,12	82580

Tabla 9.2 Energía necesaria para cada estado.

A continuación podemos ver gráficamente la evolución de con respecto a la energía de entrada de las variables anteriores:

➤ **Energía (kilovatios de entrada) frente a caudales:**

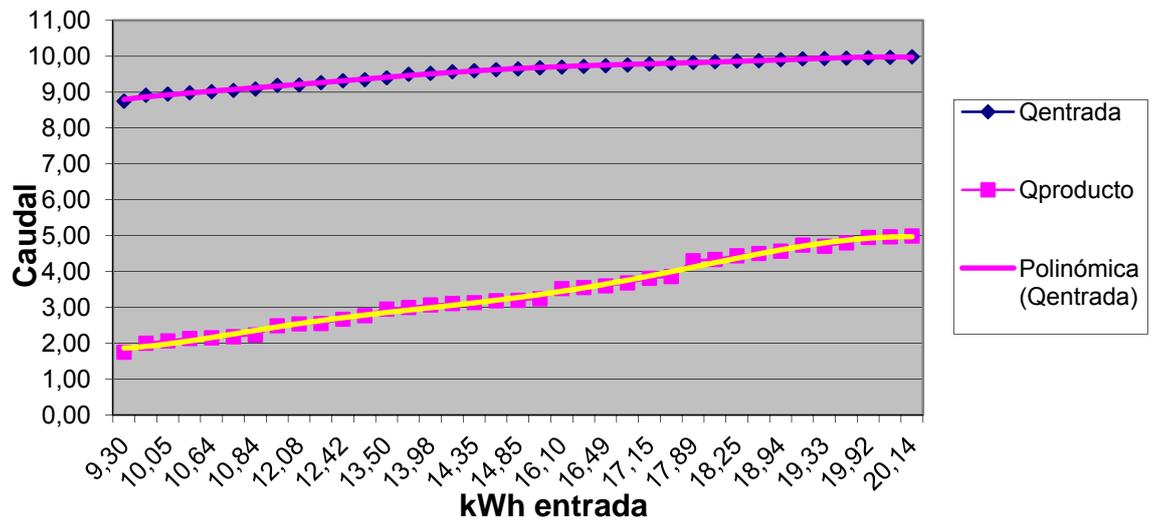


Figura 9.11 Caudal frente energía.

A mayor caudal de alimentación, más energía, en kilovatios, necesitamos a la entrada, y por la tanto, cuánto más caudal producto se obtiene, mayor gasto también.

➤ **Energía (kilovatios de entrada) frente presión de entrada y recuperación:**

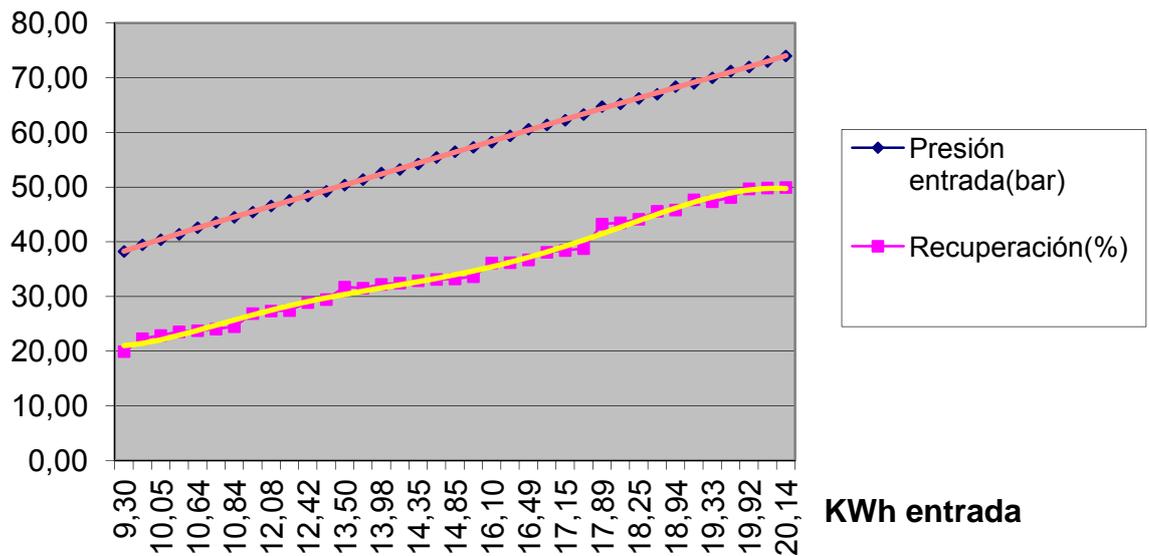


Figura 9.12 Presión y recuperación, frente energía.

Igual que ocurre con el caudal de alimentación, a mayor presión mayor gasto energético en la entrada.

También ocurre lo mismo con la recuperación, puesto que el caudal producto aumenta con respecto al caudal de alimentación.

➤ **Energía frente a conductividad de producto:**

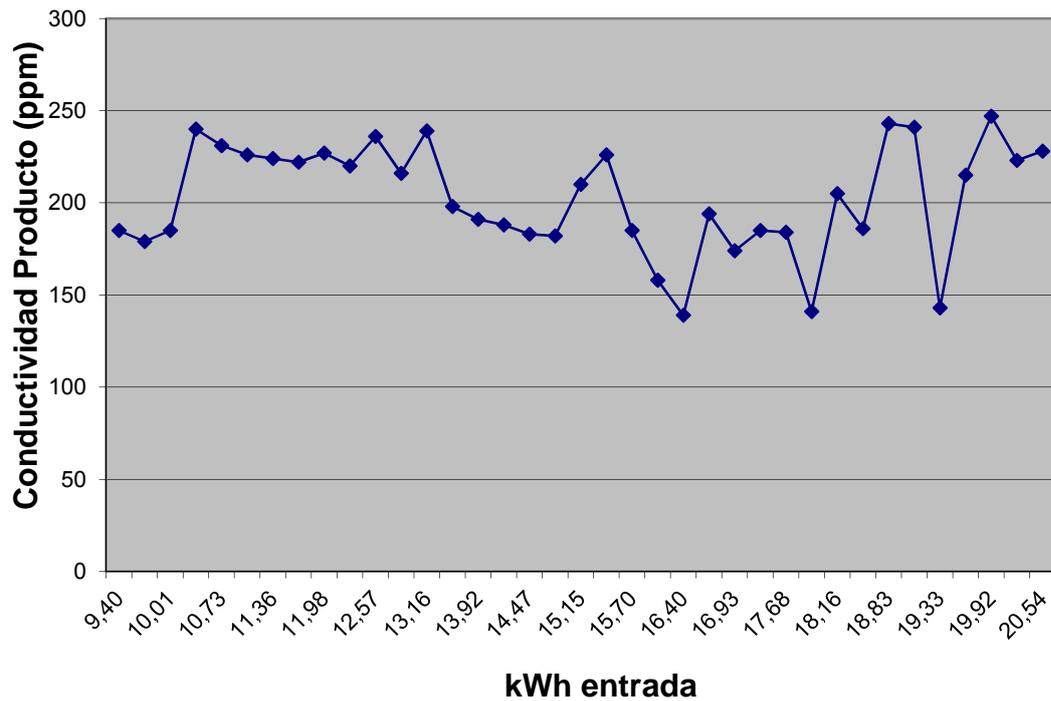


Figura 9.13 Conductividad producto frente energía

Como ya hemos mencionado anteriormente, el caudal de sal no está afectado por la presión aplicada, sino que es proporcional a la diferencia de concentración, lo mismo ocurre con la concentración de sales en el producto. Podemos decir que El rechazo de sales responde a la presión de trabajo. Al aumentar la presión de trabajo, el paso de sales sigue igual, pero se incrementa el flujo de agua. Esto produce un aumento apreciable en la calidad del agua al aumentar la presión.

➤ Energía frente a kWh/m³ producto:

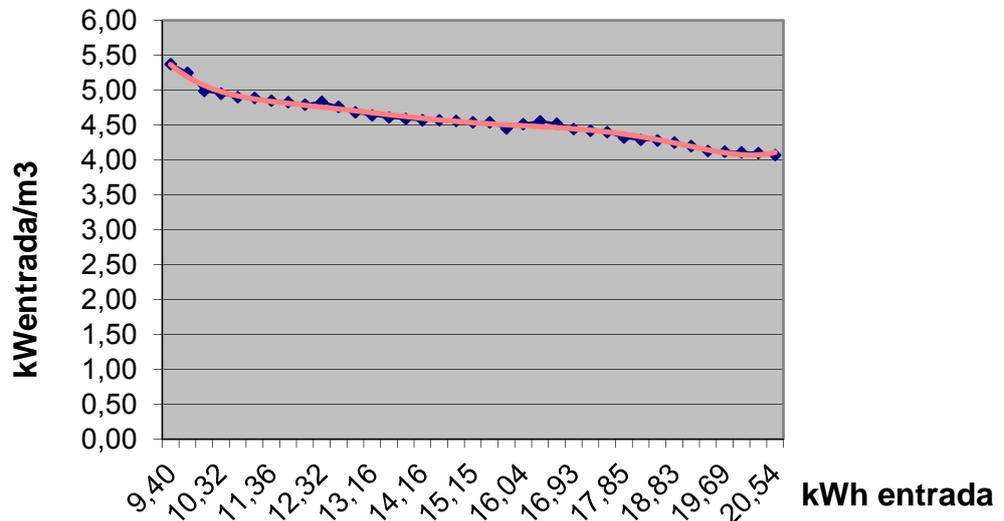


Figura 9.14 Consumo específico frente energía entrada

9.5 Diagrama energético

Si se representa en forma de esquema, los valores hemos obtenido, tenemos el siguiente diagrama energético del proceso, por cada m³ de agua producto:

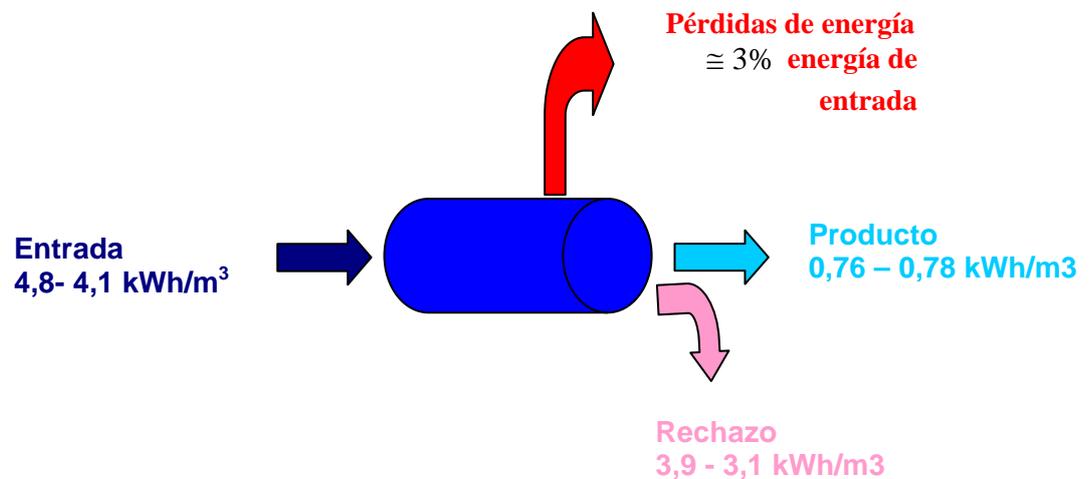


Figura 9.15 Diagrama energético

Si clasificamos los valores de energía por rango de presiones, obtenemos la siguiente tabla, en la que cada situación representa lo que necesitamos invertir para obtener 1m³ de agua producto:

Pe	Pr	m3 entrada	m3 rechazo	kWh/m ³ producto	kWh/m ³	kWh/m3 cinetica rechazo	kWh/m ³ química rechazo	total rechazo
40	39	4,33	3,31	0,7661	4,81	3,59	0,3	3,89
45	44	3,70	2,69	0,7746	4,62	3,29	0,41	3,70
50	49	3,22	2,23	0,7749	4,48	3,04	0,55	3,59
55	54	2,91	1,89	0,7751	4,44	2,84	0,68	3,52
60	59	2,65	1,67	0,7766	4,42	2,73	0,75	3,48
65	64	2,32	1,32	0,7769	4,19	2,35	0,94	3,29
70	69	2,11	1,11	0,7771	4,11	2,13	1,05	3,18

Tabla 9.3 Energía necesaria para obtención de m³ de agua

Se puede observar la evolución de los kWh por cada m³ de agua producto. En la entrada y el total del rechazo tienden a disminuir, no así la energía química para cada una de los puntos de la tabla, se puede apreciar que no se cumple la igualdad, es decir la energía que se invierte a la entrada por cada m³ de agua producto, no es igual a la suma de la energía que existe en los flujos de producto y de rechazo. Esto quiere decir que se están produciendo pérdidas. Las pérdidas a la salida representan aproximadamente el 3% de la energía de entrada, y entre 0,1 y 0,2 kWhora por cada m³ de agua que se produce.

Resumen y Conclusiones

10.1 Resumen

La presente tesis doctoral, como se ha indicado con anterioridad, se ha validado mediante el proyecto OPRODES (Optimization of RO Desalination Systems Powered by Renewable Energies, Contract JOR3-CT98-0274,) proyecto cofinanciado por la comisión Europea en el marco de trabajo del programa de energía no nuclear JOULE III.

El objetivo principal del proyecto es ofertar un sistema que incluya energías alternativas para operar con plantas de Osmosis Inversa para cualquier entorno a un costo económico, de cuyo estudio se han obtenido interesantes conclusiones que permitirá trabajar con estos procesos con seguridad de cubrir las demandas existentes.

El desarrollo de estos sistemas abre un abanico de posibilidades para su expansión debido a sus excelentes características por el concepto innovativo de trabajar a diferentes presiones y almacenamiento en agua . El uso del mismo contribuye a subsanar problemas de suministro de agua en sistemas aislados con tecnologías medioambientales.

La industria de la desalinización mediante la experiencia Oprodes puede ampliar la oferta técnica de sus membranas comerciales de agua de mar, en la actualidad operaban en rangos muy limitados acorde con los test que se realizaban.

El proyecto realiza un análisis minucioso del comportamiento de las membranas y de la respuesta que ofrece una planta piloto de Osmosis Inversa trabajando en régimen discontinuo, constantes paradas y fluctuaciones sucesivas en presión y caudal conforme los datos de simulación de potencia procedente de energías renovables (disponibilidad de viento y/o sol), sin necesidad de adquirir los equipos de producción de energía.

Para ello se ha calculado mediante los datos históricos la potencia eléctrica producida por los equipos eólicos y solares colocados en una zona geográfica determinada, Una vez correlacionados con las curvas de las máquinas, nos dan la potencia disponible en bornes, que son los que suministramos a la planta de O.I.de agua de mar para su funcionamiento. El proceso se realiza a través de un variador de velocidad que se encarga de simular la variación de potencia suministrada al motor de la planta de O.I. Ésta, presenta una gran flexibilidad en las operaciones y variabilidad de modos de funcionamiento que nos permite estudiar el comportamiento de las membranas bajo condiciones extremas de funcionamiento.

Hemos obtenido un rico historial de datos de los parámetros operacionales y que son de influencia directa en la vida de las membranas: presión, caudal, pH, conductividad, concentración de sales, temperatura, conversión. Estos ensayos se han realizado simultáneamente en la planta de OI con un tubo con una membrana y un tubo con seis membranas en espiral controlados mediante un programa informático que gobierna las ordenes de arranque, operación, paradas controladas y las de emergencia, a la vez almacena los datos técnicos de respuesta, funcionando autónomamente y en su etapa inicial durante más de 6000 horas de trabajo.

La respuesta del sistema empleado ha generado gran expectativa en el área de desalinización, por las innovaciones técnicas utilizadas, el nuevo concepto introducido y el amplio abanico de posibilidades que ofrece para extrapolar la experiencia a entornos aislados con utilidad mediata y resolutiva en zonas específicas carentes de agua con beneficio medioambiental en sitios protegidos al utilizar sistemas no contaminantes.

10.2 Resultados.

Los ensayos realizados hasta la fecha han permitido recoger datos suficientes para el estudio de las variaciones de los parámetros de trabajo de las membranas.

El análisis de los datos obtenidos de las pruebas permite visualizar la evolución de varios parámetros importantes como el flujo de producto, la recuperación, la conductividad y el consumo de energía del proceso de ósmosis inversa.

Una vez analizados los datos, nos centramos en estudiar los parámetros que consideramos más importantes

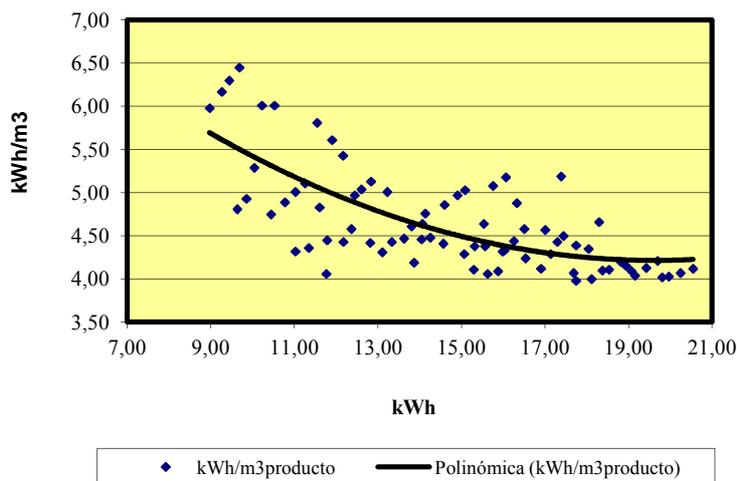


Figura 10.1. Consumo específico frente a consumo de entrada

Resultado del análisis de los datos se obtiene el gráfico de la figura 10.1, que nos muestra la relación entre el consumo energético de la planta y el gasto de energía por m³ de producto que se produce.

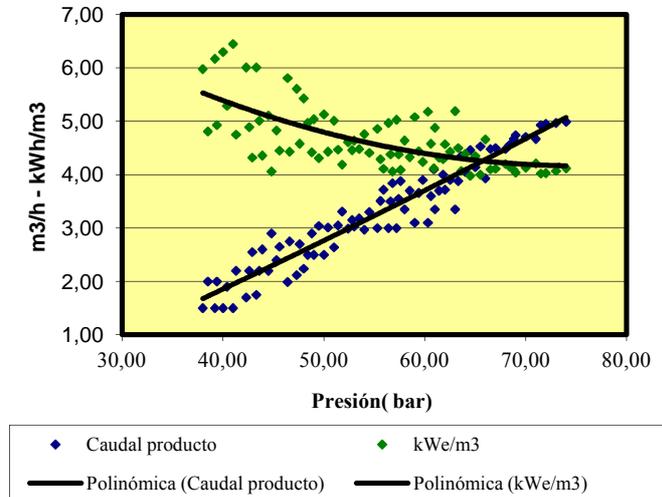


Figura 10.2 Producción y consumo específico frente a presión de entrada

Se observa que a bajas presiones el consumo total de la planta es menor pero el gasto energético para obtener un m³ de producto es mayor.

Con el incremento de la presión también aumenta el consumo total de la planta, sin embargo la energía necesaria para obtener un m³ de producto decrece. Por otro lado, cuando la presión de trabajo aumenta el consumo de kilovatios por metro cúbico de permeado obtenido es menor. Por esta razón, el coste energético para producir un m³ de producto baja mientras sube la presión de trabajo en la membrana. En la gráfica de la figura 10.2 se puede observar claramente como con el aumento de la presión la producción de producto o permeado es mayor y disminuye el consumo de energía en relación al metro cúbico que se obtiene.

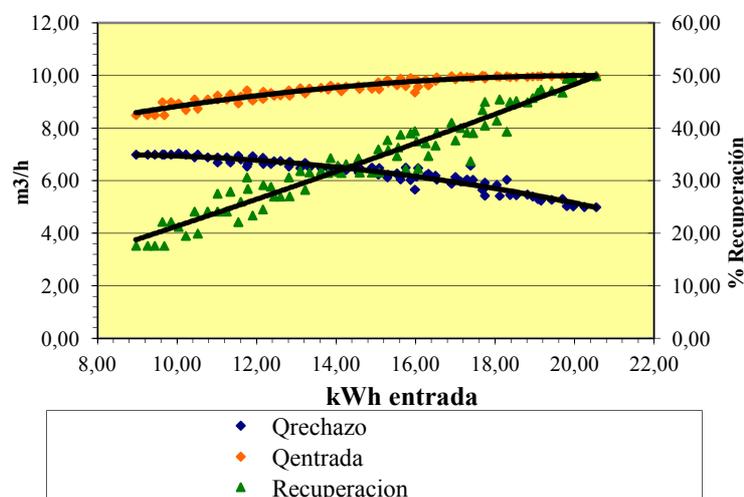


Figura 10.3 Relación entre el caudal de rechazo, caudal de alimentación y recuperación frente a consumo de entrada.

Al aumentar la presión de trabajo, el paso de sales se mantiene constante pero se incrementa el flujo de agua, esto conlleva un aumento significativo de la calidad de agua. Este hecho queda reflejado en la figura 10.3.

Se muestra como dentro de un intervalo en el que el caudal de alimentación se mantiene próximo a los 10 m³/h aumenta el factor de recuperación, aumenta el caudal de producto en relación al caudal de alimentación, y por tanto, disminuye el caudal de rechazo.

El rechazo de sales es un parámetro que es considerado prácticamente constante dentro de todo el rango de presiones de trabajo. Por tanto, a medida que aumenta el caudal de producto la concentración de sales en éste disminuye.

Esto significa que a presiones altas de funcionamiento la calidad del agua que se obtiene es mejor, a costa de un mayor consumo energético.

Otra gráfica de interés es la conductividad del producto frente a la potencia de entrada, ya que nos indicara la calidad del agua. Vemos en la grafica de la figura 10.4, que oscila en un intervalo entre 450 a 250 micro siemens estando la calidad muy por debajo de lo recomendado por la OMS.

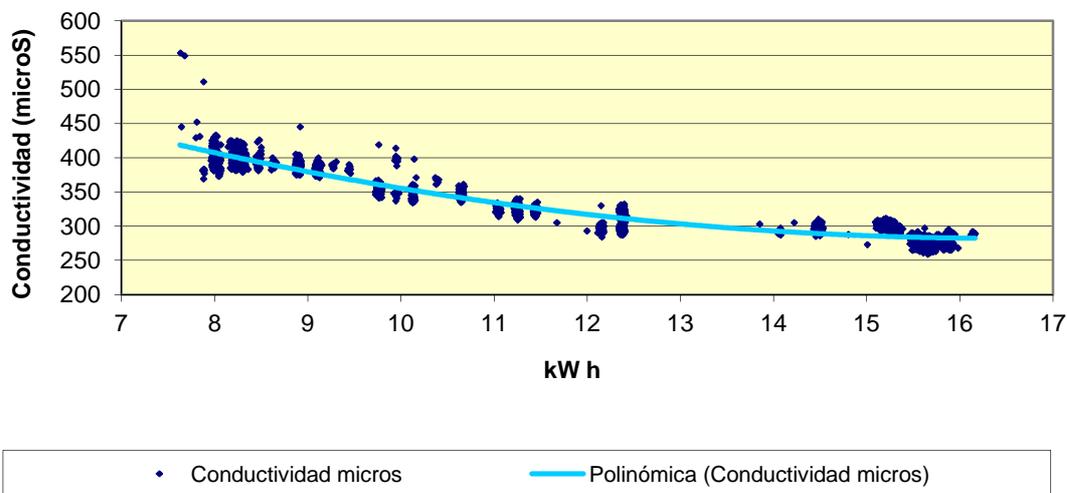


Figura 10.4 Conductividad del producto frente al consumo de la planta

Otro parámetro que se ha considerado de gran interés en el desarrollo de esta tesis es el rendimiento de la planta, frente a la potencia de entrada (figura 10.5). Entendiendo como rendimiento la relación entre la potencia teórica necesaria para la osmosis dividido por la potencia entregada a la entrada.

Se observa que el rendimiento máximo se produce entre 16 y 18 kw aproximadamente.

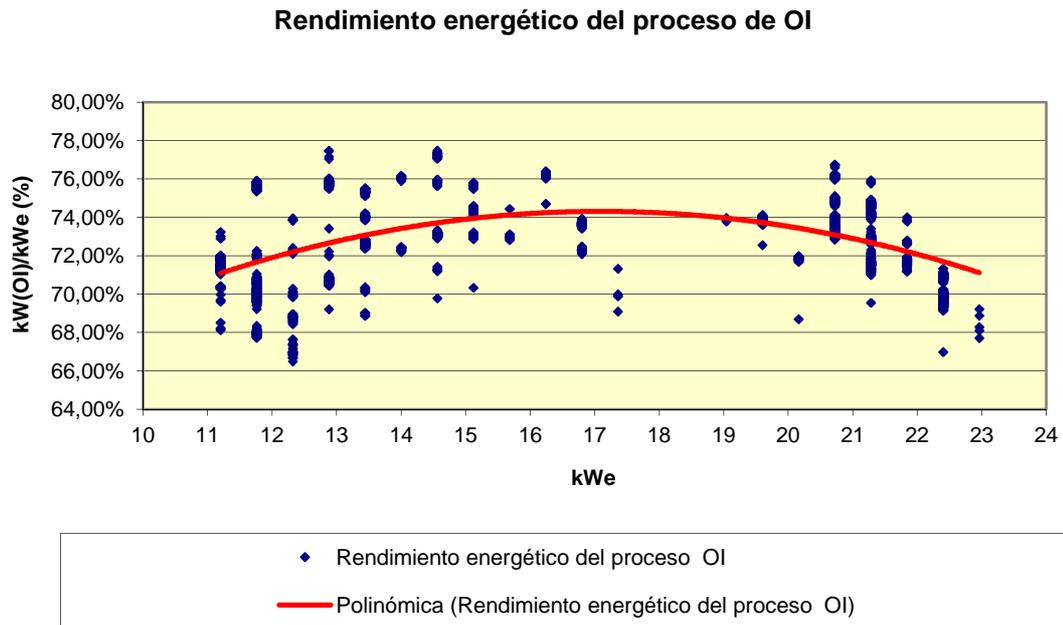


Figura 10.5 Rendimiento energético de la planta experimental

Este dato es importante debido a que se demuestra que el rendimiento óptimo de la planta se sitúa en un valor que no coincide con el de diseño de la misma.

10.3 Conclusiones

- Con el proyecto se ha demostrado la viabilidad técnica de la operación de plantas de ósmosis inversa en régimen variable. Ello corrobora los resultados teóricos previos publicados en la literatura científica.
- No se ha observado en todo el período de ensayo, deterioro de las membranas por funcionamiento en régimen variable de presión y caudal.
- La evolución obtenida por el sistema se adapta perfectamente a la variabilidad de energía procedente de fuentes energéticas no convencionales. Por tanto, se confirma la viabilidad de optimización del aprovechamiento energético de fuentes renovables, las cuales presentan un comportamiento aleatorio de operación en el tiempo.
- Se ha operado de forma discontinua con un amplio rango de potencias que influyen en las presiones de operación (35 a 80 bares), modificando la conversión, sin problemas de ensuciamiento ni de averías en las membranas. Con la opción de operación considerada de funcionamiento a caudal constante y presión variable se observa la capacidad del sistema para adaptarse a la oferta energética variable disponible
- Se ha operado automáticamente mediante software de control de la planta, a través de una instrumentación específica, el tratamiento químico adecuado y recolectado datos operacionales del sistema, demostrando que la planta experimental está preparada

para constantes paradas y arranques sin la necesidad de molestos procedimientos de puesta en marcha.

- La variedad de aerogeneradores en el mercado nos permite acoplar el más idóneo para la planta de Osmosis Inversa de agua de mar que estemos diseñando con garantía de funcionamiento, regulando “en continuo” la potencia para obtener el punto óptimo de rendimiento.
- Todos los datos de calidad de agua han sido los adecuados, siempre su promedio de salinidad estaba dentro de lo establecido por la OMS y el RD 140/2003.
- Observando los resultados, se establece que el funcionamiento óptimo de la planta ensayada de 21 kw, se presenta con un consumo de energía entre 16 y 18 kWh, donde se trabaja con presiones comprendidas entre los 57 y 67 bar.
- La energía cinética contenida en el rechazo es elevada, por lo que es aconsejable la instalación de un recuperador de energía en la línea de evacuación de la salmuera en lugar de eliminar dicha energía en la válvula de rechazo, tal y como se hace en la actualidad.

10.5 Líneas futuras de actuación propuestas

Como consecuencia del trabajo desarrollado y de la imposibilidad material de recorrer todos sus senderos, han surgido una serie de cuestiones que han quedado sin respuesta y sobre las que debería actuarse

En este contexto, entre los temas sobre los que el doctorando propone que se profundice caben mencionar los siguientes:

- a) Uso de la desalación de agua como alternativa a sistemas de almacenamiento de energía en sistemas aislados.
- b) Diseño de configuraciones de tubos/membranas para su uso en sistemas variables de desalación de agua.
- c) Uso de sistemas de desalación con energías renovables y generación como soluciones compactas a las necesidades de una gran parte de la población.
- d) Control automático de estos sistemas.
- e) Estudio del sistema óptimo de recuperación de energía en régimen variable.
- f) Ensayos en el futuro con un sistema de generación real.
- g) Utilizar otros parámetros de operación de la planta para adaptarse a la energía disponible

Bibliografía

Alward R, Lising ER, Lawand TA (1973). The effect of a variable power input on the performance of reverse osmosis desalination unit. 4th International Symposium on Fresh Water from the Sea. Vol.4, pp 25-34

Barros VC, Estevan EA (1983) On the evaluation of wind power from short wind records. J. of Climate and Applied Meteorology.22,1116-1123

Baynes, C. J. (1974) The statistics of strong winds for engineering applications. Ph.D. thesis, University of Western Ontario, 266 pp.

Belessiotis V. and Delyannis E. (2001) Water shortage and renewable energies (RE) desalination possible technological applications, *Desalination*, 139, 133-138

Belessiotis V., Delyannis E. (2000) The history of renewable energies for water desalination. *Desalination*, 128, 147-159

Belfort G (1989) Fluid mechanics in membrane filtration: Recent development. *Journal of Membrane Science* 40, 123-147

Bermudez-Contreras A., Thomson M., Infield D.G. (2008) Renewable energy powered desalination in Baja California Sur, Mexico. *Desalination*, 220, 431-440

Boucekima B. (2003a) A small solar desalination plant for the production of drinking water in remote arid areas of southern Algeria. *Desalination*, 159,197-204

Boucekima B. (2003b) Solar desalination plant for small size use in remote arid areas of South Algeria for the production of drinking water. *Desalination*, 156,353-354

Bouguecha S., Hamrouni B., Dhabbi M. (2005) Small scale desalination pilots powered by renewable energy sources: case studies. *Desalination*, 183,151-165

Boxwell M (2011) Solar Electricity Handbook: A Simple Practical Guide to Solar Energy - Designing and Installing Photovoltaic Solar Electric Systems. Greenstream Publishing

Brian PLT (1965) Influence of concentration polarization on reverse osmosis systems design. 1st International Symposium on Water Desalination, Washington, DC

Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E (2001) Wind Energy Handbook. Wiley

Cádiz JC (1984) La energía eólica. Hermann Blume

Cadwallader EA et al. (1977) The application of wind energy systems to desalination. William son Engineering Associates Inc., Navarre, Fla, prepared for Office of Water Research an Technology. Washington, DC

Calero R, Carta JA (2004) Action plan for wind energy development in the Canary Islands. Energy Policy, 32, 1185–1197

Camacho EF, Berenguel M, Rubio FR, Martínez D (2010) Control of Solar Energy Systems. Springer

Carta JA (2010) Integration of renewable energy system into remote micro-grids. In: Stand-alone and hybrid wind energy systems (Ed. Kaldellis JK). Woodhead Publishing series in Energy. 425-474

Carta JA (1991). Optimización técnico-económica de sistemas de desalación accionados por energía eólica. Aplicación a las Islas Canarias. Tesis Doctoral Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Carta JA, González J., Subiela V. (2004) The SDAWES project: an ambitious R&D prototype for wind-powered desalination. Desalination, 161,33-48.

Carta JA, Ramírez P, Velázquez S (2008c) Influence of the level of fit of a density probability function to wind-speed data on the WECS mean power output estimation. Energy Conversion and Management 49,2647-2655

Carta JA, Bueno C, Ramírez P. (2008a). Statistical modelling of directional wind speeds using mixtures of von Mises distribution: Case study. *Energy Conversion & Management*, 49, 897-907.

Carta JA, Calero R, Colmenar A, Castro MA.(2009) Centrales de energías renovables. Pearson.

Carta JA, González J. (2001) Self-sufficient energy supply for isolated communities: wind-diesel systems in the Canary Islands. The Energy Journal, 22, 115-145

Carta JA, González J., Gómez C. (2003b) Operating results of a wind–diesel system which supplies the full energy needs of an isolated village community in the Canary Islands. Solar Energy, 74, 53–63

Carta JA, González J., Subiela V. (2003a) Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands. *Solar Energy*, 75,(2): 153-168.

Carta JA, Ramírez P, Velázquez S (2009b) A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis Case studies in the Canary Islands. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13, 933–955

Carta JA, Ramírez, P, Bueno, C. (2008b). A joint probability density function of wind speed and direction for wind energy analysis. *Energy Conversion & Management*, 49, 1309-1320.

Carta JA, Rodríguez C, Calero R. (1995). Planta experimental del centro de investigación de Energías y Agua de Pozo Izquierdo. Simulación de la producción de agua con energía eléctrica de origen eólico. *ASA*, 1,64-68

Carta JA, Velázquez S, Matías JM (2011) Use of Bayesian networks classifiers for long-term mean wind turbine energy output estimation at a potential wind energy conversion site. *Energy Conversion and Management* 52, 1137-1149

Clarke R. (1993) Water: the international crisis. MIT Press.

Colangelo A., Marano D., Spagna G. and Sharma V.K. (1999) Photovoltaic powered reverse osmosis sea water desalination systems. *Applied Energy*, 64, 289-305.

Cosgrove W.J. and Rijsberman F.R. (2000) World water vision: making water everybody's business. Earthscan

Cruz I, Calero R, Rodríguez C, González J, Carta JA. (1996) Seawater desalination plants connected an autonomous wind energy system. In Proceedings of the 1996 European Union Wind Energy Conference and Exhibition, pp. 370-373, Göteborg, Sweden

Da Costa AR, Fane AG, CJD, Franken ACM (1991) Optimal channel spacer design for ultrafiltration. *Journal of Membrane Science* 62, 275-291

Dehmas D.A., Kherba N., Hacene F.B., Merzouk N.K., Merzouk M., Mahmoudi H., Goosen M.F.A. (2011) On the use of wind energy to power reverse osmosis desalination plant: A case study from Ténès (Algeria). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 956-963

Delgado-Torres A.M., García-Rodríguez L. (2007) Status of solar thermal-driven reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216, 242-251

Delyannis E. (2003) Historic background of desalination and renewable energies. *Solar Energy*,75, 357-366

Denisov GA (1994) Theory of concentration polarization in cross-flow ultrafiltration: Gel-layer model and osmotic-pressure model. *Journal of Membrane Science* 91, 173-187

Eltawil M.A., Zhengming Z., Yuan L. (2009). A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2245-2262

EWEA (2009) Wind Energy-The Facts. Earthscan.

Fariñas M (1999) Osmosis inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. MC Graw-Hill

Fernández-López C., Viedma A., Herrero R., Kaiser A.S. (2009) Seawater integrated desalination plant without brine discharge and powered by renewable energy systems. *Desalination*, 235, 179-198

Feron P. (1985) The use of windpower in autonomous reverse osmosis seawater desalination. *Wind Engineering*, 9, 180-199

Fries S, Mohn J, Petersen G (1981). Sea water desalination powered by wind energy. Proceedings of the International Colloquium on Windenergy, Brighton, U.K. pp 167-172

Frost W, Nowak DK (1977) Handbook for WTG siting relative to small scale terrain features. United States Energy Research and Development Administration. Contract no. E(45-1)-2443.

García-Rodríguez L. (2003) Renewable energy applications in desalination: state of the art, *Solar Energy*, 75, 381-393.

García-Rodríguez L. (2002) Seawater desalination driven by renewable energies: a review. *Desalination*, 143, 103-113

Gibbons J., Papapetrou M., Epp C. (2008) Assessment of EU policy: Implications for the implementation of autonomous desalination units powered by renewable resources in the Mediterranean region. *Desalination*, 220, 422-430

Gipe P. (1995) Wind Energy. Wiley

Gleick, P. (1993) Water in crisis. Oxford University Press. New York.

Gleick, P. (2000) World's water 2000-2001. Island Press.

Goel V, McCutchan JW (1977) Systems design of a tubular RO plant. Desalination Report No. 64, Water Resources Center, USA.

González J, Vega R, Carta JA, Janssen W, Calero R, Caballero J (1997) A control system design for an autonomous wind-park with different types of desalination plants in the Canary Islands. In Proceedings of European Wind Energy Conference, Tsipouridis JL (Eds), pp. 1034-1037, Dublin Castle, Ireland.

Goosen M.F.A., Sablani S.S., Paton C., Pret J. Al-Nuaimi A., Haffar I., Al-Hinai H., and Shayya W.H. (2003) Solar energy desalination for arid coastal region: development of a humidification seawater greenhouse. *Solar Energy*, 75, 413-419

- Gude V.G., Nirmalakhandan N., Deng S. (2010)** Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2641-2654
- Gupta BB, Zaboubi B, Jaffrin MY (1993)** Sacaling up pulsatile filtration flow methods to a pilot apparatus equipped with mineral membranes. *Journal of Membrane Science* 80, 13-20
- Hanafi A. (1994)** Desalination using renewable energy sources. *Desalination*, 97,339-352
- Harrison D.G., Ho G.E., Mathew K. (1996)** Desalination using renewable energy in Australia. *Renewable Energy*, 8, 509-513
- Hasnain S.M. and Alajlan S.A. (1998)** Coupling of PV-powered RO brackish water desalination plant with solar stills. *Desalination*, 116, 57-64
- Hay JE, Davies JA (1978)** Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface, in *Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop*, J. E. Hay and T. K. Won, eds., Toronto, Ontario, Canada.
- He T., Yan L. (2009)** Application of alternative energy integration technology in seawater desalination. *Desalination*, 249, 104-108
- Heijman S.G.J., Rabinovitch E., Bos F., Olthof N., van Dijk J.C. (2009)** Sustainable seawater desalination: Stand-alone small scale windmill and reverse osmosis system. *Desalination*, 248, 114-117
- Henderson C.R., Manwell J.F., McGowan J.G. (2009)** A wind/diesel hybrid system with desalination for Star Island, NH: feasibility study results. *Desalination*, 237, 318-329
- Hennessey JP (1977)** Some aspects of wind power statistics. *J.Appl. Meteor*, 16,119-128
- Herold D. and Neskakis A. (2001)** A small PV-driven osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria. *Desalination*, 137, 285-292
- Herold D., Horstman V., Neskakis A., Marliani J., Piernavieja G. and Calero R. (1998)** Small scale photovoltaic desalination for rural water supply-demonstration plant in Gran Canaria, *Renewable Energy*, 14, 293-298
- Hidy GM (1972).** Los vientos. Van Nostrand Momentum Books
- Houcine I, Benjemaa F, Chahbani MH, Maalej M.(1999)** Renewable energy sources for water desalting in Tunisia. *Desalination*, 125,123–132.
- Jones CN (1986).** Notes on the effect of site wind-speed frequency distribution and machine performance characteristics on the annual energy output of a WECS. *Wind Eng*; 10:31–46
- Jones CN (1988).** The prediction of wind turbine energy output; a brief survey. *Wind Eng*; 12:76–87.

Justus CG (1980) Vent et performances des éoliennes. SCM

Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A, Graber D (1978). Methods for estimating wind speed frequency distributions. *J Appl Meteor*;17:350–353.

Justus CG, Mikhail A (1976) Height variation of wind speed and wind distributions statistics. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 3,. 261-264

Kaldellis J.K., Kavadias K.A., Kondili E. (2004) Renewable energy desalination plants for the Greek islands—technical and economic considerations. *Desalination*, 170,187-203

Keeper B.G., Hembree R.D. and Schrack F.C. (1985) Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination. *Desalination*, 54, 89-103

Kendall MG, Stuart A, Ord JK (1961) The advanced theory of statistics.Vol.2. Griffin

Kershman S.A., Rheinländer J., Gabler H. (2003) Seawater reverse osmosis powered from renewable energy sources - hybrid wind/photovoltaic/grid power supply for small-scale desalination in Libya. *Desalination*, 153, 17-23

Kershman SA, Rheinländer J, Neumann T, Goebel O. (2005). Hybrid wind/PV and conventional power for desalination in Libya-GECOL's facility for medium and small scale research at Ras Ejder. *Desalination*, 183, 1–12.

Kiranoudis C.T., Voros N.G., Maroulis Z.B. (1997) Wind energy exploitation for reverse osmosis desalination plants. *Desalination*, 109, 195-209

Klucher TM (1979) Evaluation of Models to Predict Insolation on Tilted Surfaces, *Solar Energy*. 23, 111-114.

Koeppel GW (1982). Putnam's power from the wind. Van Nostrand Reinhold.

Kondili E. (2010) Hybrid wind energy systems for desalination. In Stand-alone and hybrid wind energy systems (Ed. Kaldellis J.K.). Woodhead Publishing Limite 506-535

Krauter SCW (2010) Solar Electric Power Generation - Photovoltaic Energy Systems: Modeling of Optical and Thermal Performance, Electrical Yield, Energy Balance, Effect on Reduction of Greenhouse Gas. Springer

Kucera J (2010) Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers. Wiley

Libert JJ, Maurel A (1981). Desalination and renewable energies. A few recent development. *Desalination*, 39, pp. 363-372

Lindemann J.H. (2004) Wind and solar powered seawater desalination applied solutions for the Mediterranean, the Middle East and the Gulf countries. *Desalination*, 168, 73-80

Liu BYH, Jordan RC (1961) Daily Insolation on Surfaces Tilted Towards the Equator, *ASHRAE Journal* 3, 53-59.

- Liu CCK , Park JW, Migita R., Qin G. (2002).** Experiments of a prototype wind-driven reverse osmosis desalination system with feedback control. *Desalination*, 150, 277–287
- Lonsdale HK, Merten U, Riley RL (1965)** Transport properties of CA osmotic membranes. *Journal Applied Polymer Science* 9, 1341-1362
- Lopez-Leiva M (1980)** Ultrafiltration at low degrees of concentration polarization-Technical possibilities. *Desalination* 35, 115-1128
- Lysen EH (1983).** Introduction to wind energy. Consultancy Services Wind Energy Developing Countries.
- Macagnan MH (1993)** Caracterización de la radiación solar para aplicaciones fotovoltaicas en el caso de Madrid. Tesis doctoral. ETSI Telecomunicación Madrid.
- Mahmoudi H., Abdellah O., Ghaffour N. (2009)** Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria.. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 921-926
- Markvart T (2008)** Solar electricity. Wiley
- Marsh AR, Eriksson PK (1988)** Projecting RO desalination system performance with film-tee spiral-wound elements. *Proceedings of the Seminar on Membrane Processes*, Orlando, Fla
- Mathioulakis E., Belessiotis V., Delyannis E (2007)** Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 203, 346-365
- Matthiason E, Sivik B (1980)** Concentration polarization and fouling. *Desalination* 35, 59-103
- Maurel A (1979).** Desalement et energies nouvelles. *Desalination*, 31. pp. 489-499
- McBride R, Howden J, Morris R, Hanbury W (1987).** Wind power. A reliable source for desalination. *Desalination*, 67, pp. 559-564
- Medina JA (1999)** Desalación de aguas salobres y de mar. Ósmosis inversa. Paraninfo
- Merten U, Lonsdale HK, Riley RL (1964)** Boundary-layer effects in reverse osmosis. *Industrial Engineering Chemistry Fundamentals* 3, 210-213
- Millevialle J, Odendaal PE, Wiesner MR (1999)** Tratamiento del agua por procesos de membrana. Mc Graw-Hill
- Miranda MS, Infield D (2003)** A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination* 153, 9–16
- Paeschke W (1937)** Experimentelle Untersuchungen z. Rauigkeits und stabilitätsproblem in der bodennahen Luftschicht. *Beitr. Phys.d.fr. Atmos.*, 24,163-189

Papapetrou M., Epp C., Teksoy S., Sözen S., Subiela V., Seibert U., Vogt G. (2005) Market analysis for Autonomous Desalination Systems powered by renewable energy in southern Mediterranean countries. Case study on Turkey. Desalination, 183,29-40

Patel S.G., Bhatnagar S., Vardia J., Ameta S.C. (2006) Use of photocatalysts in solar desalination. Desalination, 189, 287-291

Paulsen K., Hensel F. (2005) Introduction of a new Energy Recovery System—optimized for the combination with renewable energy. Desalination, 184, 211-215

Paulsen K., Hensel F. (2007) Design of an autarkic water and energy supply driven by renewable energy using commercially available components. Desalination, 203, 455-462

Pérez M (1998) Las Energías renovables. Un enfoque político-ecológico. Editorial Catarata, España.

Perez R, Stewart R (1984) Validation of an Anisotropic Model Estimating Insolation on Tilted Surfaces, Progress in Solar Energy, Vol. VII, American Solar Energy Society.

Petersen G, Fries S, Kaiba K, Knunz D (1983). Wind-powered water desalination plant for small island community at the German coast of the North Sea. Design and working experience. Conference Energy for rural and island Community. Inverness, Scotland U.K. Pp 173-180

Petersen G, Fries S, Mohn J, Muller A (1979). Wind and solar-powered reverse osmosis desalination units. description of two demonstration projects. Desalination, 31, pp. 501-509

Petrella R. (2001) The Water Manifesto: Arguments for a World Water Contract. Zed Books.

Pitera ES, Middleman S (1973) Convection promotion in tubular desalination membranes. Industrial Engineering Chemistry, Process Design and Development 12, 52-56

Pohl R, Kaltschmitt M, Holländer R (2009). Investigation of different operational strategies for the variable operation of a simple reverse osmosis unit. Desalination 249, 1280-1287

Pohland HW (1988) Theory of membrane processes. Proceedings of the AWWA Annual Conference, Orlando, Fla.

Porter MC (1990) Ultrafiltration. In Porter MC (ed). Handbook of industrial membrane processes. Noyes Publications.

Puig J, Meseguer C, Cabre M (1982) El poder del viento. Ecotopia

- Ramírez P, Carta JA (2005)** Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind speed probability density distribution: a case study. *Energy Conversion and Management* 46,2419–2438
- Rautenbach R, Albrecht R (1989)** Membrane processes. Wiley
- Robinson R, Ho G., Mathew K. (1992)**. Development of a reliable low-cost reverse osmosis desalination unit for remote communities. *Desalination*, 86, 9–26.
- Rodríguez JL, Burgos JC, Arnalte S (2003)** Sistemas eólicos. Editorial Rueda SL.
- Rosenfeld J, Loeb S (1967)** Turbulent region performance of reverse osmosis desalination tubes. *I&EC Process Design and Development* 6, 123-127
- Salomon S (1968)**. Le dessalement de l'eau de mer par l'énergie éolienne. *L'eau*, 55,5,pp. 225-227
- Scrivani A. (2005)** Energy management and DSM techniques for a PV-diesel powered sea water reverse osmosis desalination plant in Ginostra, Sicily. *Desalination*, 183,63-72
- Schock G, Miquel A (1987)** Mass transfer and pressure loss in spiral-wound modules. *Desalination* 64, 339
- Seibert U., Vogt G., Brenning C., Gebhard R., Holz F. (2004)** Autonomous desalination system concepts for seawater and brackish water in rural areas with renewable energies — potentials, technologies, field experience, socio-technical and socio-economic impacts — ADIRA. *Desalination*, 168,29-37
- Subiela V, Carta J.A., González J. (2004)** The SDAWES project: lessons learnt from an innovative project. *Desalination*, 168,39-47.
- Suleimani Z. and Nair V. (2000)** Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman. *Desalination*, 65, 367-380
- Temps RC, Coulson KL. (1977)** Solar Radiation Incident Upon Slopes of Different Orientations, *Solar Energy* 19, 179-184.
- Thomson M, Infield D. (2003)** A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. *Desalination*, 153, 1-8
- Twidell J, Weir T (2000)** Renewable energy resources. Spon Press
- Tzen E. and Morris R. (2003)** Renewable energy sources for desalination. *Solar Energy*, 75, 375-379
- Tzen E., Theofilloyianakos D., Kologios Z. (2008)** Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned. *Desalination*, 221, 29-36
- Tzen E., Theofilloyianakos D., Kologios Z. (2008)** Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned. *Desalination*, 221, 29-36

Velázquez S, Carta JA, Matías JM (2011) Influence of the input layer signals of ANNs on wind power estimation for a target site: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 1556–1566

Veza J.M., Peñate B., Castellano F. (2001) Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid tests). *Desalination*, 141,53-61

Veza J.M., Peñate B., Castellano F. (2004) Electrodialysis desalination designed for off-grid wind energy, *Desalination*, 161,211-221

Voivontas D., Yannopoulos K., Rados K., Zervos A., Assimacopoulos D. (1999) Market potential of renewable energy powered desalination systems in Greece. *Desalination*, 121,159-172

Vujic, R. and Krneta M. (2000) Wind-driven seawater desalination plant for agricultural development on the islands of the County of Split and Dalmatia. *Renewable Energy*, 19, 173-183

Warfel CG, Manwell JF, McGowan JG (1988). Techno-economic study of autonomous wind driven osmosis desalination systems. *Solar & Wind Technology*. Vol.5.,No.5, pp. 549-561

Weibull W (1939) A Statistical Theory Of The Strength Of Materials. *Ingeniörsvetenskapsakademiens Handlingar Nr 151*, 1939, Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, Stockholm.

Weiner D, Fisher D., Moses EJ, Katz B, Meron G. (2001) Operation experience of solar- and wind- powered desalination demonstration plant. *Desalination*, 137, 7-13

Weiner D., Fisher D., Moses E.J., Katz B. and Meron G. (2001) Operation experience of solar- and wind- powered desalination demonstration plant. *Desalination*, 137, 7-13

