

**UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE PROCESOS**



**Programa de Doctorado: Tecnología Industrial**

**TESIS DOCTORAL**

**OPTIMIZACION DE COSTES EN LINEAS DE PRODUCCION  
PARA PLANTAS DESALINIZADORAS DE AGUA DE MAR  
MEDIANTE OSMOSIS INVERSA EN LAS ISLAS CANARIAS**

**TOMO I: MEMORIA**

**Director: Dr. D. José J. Sadhwani Alonso**

**Director: Dr. D. Luís Álvarez Álvarez**

**Doctorando: José Juan Feo García**

**Fecha: Julio 2013**

## Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a todo el personal, oficiales, peones y jefes de mantenimiento que me han ayudado de forma desinteresada en la recogida de los datos de las plantas desalinizadoras.

De una manera especial quiero mencionar a mi sobrina Pilar Torrent de la Fe, alumna de la U.L.P.G.C., que con su compañía, constancia y empuje han hecho de las horas más difíciles de esta Tesis Doctoral un camino más agradable en los últimos meses de la misma.

A mi amiga Noemi Melián Martel, la cual me ha prestado su paciencia, atención, comprensión y su inestimable tranquilidad para el desarrollo de la misma.

A mis queridos amigos Paulino Montesdeoca de la Guardia y Celso Perdomo González, que sin su colaboración, esta Tesis Doctoral se hubiese eternizado en el tiempo.

A todas las empresas que dejándome observar el funcionamiento de sus instalaciones y facilitándome todos los datos reales y actuales que se han pedido han hecho que esta Tesis Doctoral sea una realidad.

A los Doctores Don José Jaime Sadhwani Alonso y Don Luis Alvarez Alvarez que me han aconsejado en todo momento y que me han prestado su inestimable comprensión y ayuda para la realización de esta Tesis Doctoral.

A mi mujer, Malena, mis hijos, Jose y Elena, por la comprensión en todo el desarrollo de esta Tesis Doctoral, soportando en determinados momentos mis enfados. Un gran abrazo y un beso para los tres.

Por último mis agradecimientos a mi Padre José Feo Perdomo (q.e.p.d.) y a mi Madre María Rosa García Bethencourt (q.e.p.d.), que se me han ido en el tiempo de redacción de la T.D. y que siempre me han inculcado la fuerza de voluntad y el tesón para poder alcanzar las metas propuestas en esta vida.



## INDICE GENERAL

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>Capítulo 1. Antecedentes</b>   | 23   |
| 1.1 Presentación  | 25   |
| 1.1.1 Formación Académica   | 25   |
| 1.1.2 Actividad Académica/Profesional/Gestión                                 | 25   |
| 1.2 Programa de Doctorado   | 26   |
| 1.3 Trámites administrativos. Unidad del Tercer Ciclo y Postgrado de la ULPGC | 27   |
| 1.4 Estudio de la idea para la redacción de la Tesis Doctoral                 | 27   |
| <br>  |      |
| <b>Capítulo 2. Proceso de la ósmosis inversa</b>                              | 29   |
| 2.1 Consideraciones Iniciales   | 31   |
| 2.2 La desalinización en España/Islas Canarias                                | 45   |
| 2.3 Parámetros Generales en Plantas Desalinizadoras de O.I.                   | 50   |
| 2.3.1 Caudales de agua y concentraciones                                      | 50   |
| 2.3.2 Ecuación de transporte del agua   | 50   |
| 2.3.3 Factor de conversión  | 51   |
| 2.3.4 Factor de rechazo   | 51   |
| 2.3.5 Caudal de agua producto   | 51   |
| 2.3.6 Paso de sales   | 52   |
| 2.4 Descripción del proceso tecnológico de la Ósmosis Inversa                 | 52   |
| 2.4.1 Toma y bombeo de agua de mar  | 57   |
| 2.4.2 Pretratamientos físico y químico: filtración y adición de reactivos     | 58   |
| 2.4.3 Grupo de motobomba de alta presión                                      | 62   |
| 2.4.4 Bastidores de membranas. Líneas de producción                           | 64   |
| 2.4.5 Sistemas de recuperación de energía                                     | 67   |
| 2.4.6 Postratamientos   | 85   |
| 2.5 Análisis de Costes en Plantas Desalinizadoras de O.I.                     | 87   |
| 2.5.1 Costes de inversión   | 90   |
| 2.5.1.1 Coste de inversión o capital inicial                                  | 90   |
| 2.5.1.2 Coste de amortización del capital inicial                             | 92   |
| 2.5.2 Costes de operación o explotación                                       | 93   |

|  |            |
|--|------------|
|  | Pág.       |
| 2.5.2.1 Coste de consumo de reactivos                            | 94         |
| 2.5.2.2 Coste de reposición de filtros de cartuchos              | 96         |
| 2.5.2.3 Coste de reposición de membranas                         | 97         |
| 2.5.2.4 Coste de personal  | 99         |
| 2.5.2.5 Coste de mantenimiento                                   | 100        |
| 2.5.2.6 Coste medioambiental                                     | 101        |
| 2.5.2.7 Coste del consumo energético                             | 103        |
| <b>Capítulo 3. El agua</b>                                       | <b>109</b> |
| 3.1 Introducción   | 111        |
| 3.2 Características principales del Agua de Mar/Rechazo/Producto | 111        |
| 3.3 Calidad del agua potable                                     | 114        |
| <b>Capítulo 4. Objetivos previos</b>                             | <b>117</b> |
| <b>Capítulo 5. Revisión bibliográfica</b>                        | <b>121</b> |
| 5.1 Investigación bibliográfica                                  | 123        |
| 5.2 Revisión bibliográfica                                       | 125        |
| 5.3 Estado del Arte  | 125        |
| 5.4 Frontera del conocimiento                                    | 141        |
| <b>Capítulo 6. Objetivos definitivos</b>                         | <b>143</b> |
| 6.1 Introducción   | 145        |
| 6.2 Objetivos definitivos  | 145        |
| <b>Capítulo 7. Metodología y cálculos previos</b>                | <b>147</b> |
| 7.1 Introducción   | 149        |
| 7.2 Experiencia de campo   | 150        |
| 7.3 Esquema general de la planta                                 | 153        |
| 7.4 Análisis de costes   | 154        |
| 7.4.1 Costes de inversión  | 155        |
| 7.4.1.1 Coste de inversión o capital inicial                     | 155        |
| 7.4.1.2 Coste de amortización del capital inicial                | 191        |

|  | Pág. |
|--|------|
| 7.4.2 Costes de operación o explotación                            | 192  |
| 7.4.2.1 Coste de consumo de reactivos                              | 192  |
| 7.4.2.2 Coste de reposición de filtros de cartuchos                | 197  |
| 7.4.2.3 Coste de reposición de membranas                           | 200  |
| 7.4.2.4 Coste de personal  | 202  |
| 7.4.2.5 Coste de mantenimiento                                     | 211  |
| 7.4.2.6 Coste medioambiental                                       | 212  |
| 7.4.2.7 Coste del consumo energético                               | 217  |
| 7.5 Modelo Matemático  | 229  |
| 7.5.1 Consideraciones iniciales                                    | 229  |
| 7.5.2 El análisis multivariante                                    | 243  |
| 7.5.3 Proceso para la definición del modelo matemático             | 249  |
| 7.5.3.1 Datos iniciales  | 249  |
| 7.5.3.2 Representación gráfica de datos                            | 250  |
| 7.5.3.3 Estudio de valores anómalos                                | 264  |
| 7.5.3.4 Datos definitivos  | 269  |
| 7.5.3.5 Pruebas de kolmogórov-Smirnov y Shapiro-Wilk               | 270  |
| 7.5.3.6 Análisis factorial   | 285  |
| 7.5.3.7 Obtención del modelo matemático                            | 291  |
| 7.5.3.7.1 Análisis de varianza univariante                         | 291  |
| 7.5.3.7.2 Análisis de MCP (consumo energético)                     | 295  |
| 7.5.3.7.3 Análisis de MCP (filtros)                                | 297  |
| 7.5.3.7.4 Análisis de varianza univariante                         | 299  |
| 7.5.3.7.5 Análisis de MCP (consumo energético)                     | 302  |
| 7.5.3.7.6 Análisis de MCP (filtros)                                | 303  |
| 7.6 Simulación con datos reales                                    | 306  |
| 7.6.1 Simulación para una producción de 500 m <sup>3</sup> /día    | 306  |
| 7.6.2 Simulación para una producción de 1.000 m <sup>3</sup> /día  | 310  |
| 7.6.3 Simulación para una producción de 2.000 m <sup>3</sup> /día  | 313  |
| 7.6.4 Simulación para una producción de 5.000 m <sup>3</sup> /día  | 317  |
| 7.6.5 Simulación para una producción de 7.500 m <sup>3</sup> /día  | 321  |
| 7.6.6 Simulación para una producción de 10.000 m <sup>3</sup> /día | 325  |
| 7.6.7 Simulación para una producción de 12.000 m <sup>3</sup> /día | 329  |

|  |            |
|--|------------|
|  | Pág.       |
| 7.6.8 Simulación para una producción de 15.000 m <sup>3</sup> /día | 333        |
| <b>Capítulo 8. Análisis de resultados</b>                          | <b>339</b> |
| 8.1 Introducción   | 341        |
| 8.2 Análisis de Resultados y Graficas                              | 341        |
| 8.2.1 Costes de inversión  | 341        |
| 8.2.1.1 Coste de inversión o capital inicial                       | 341        |
| 8.2.1.2 Coste de amortización del capital inicial                  | 345        |
| 8.2.2 Costes de operación o explotación                            | 347        |
| 8.2.2.1 Coste de consumo de reactivos                              | 347        |
| 8.2.2.2 Coste de reposición de filtros de cartuchos                | 349        |
| 8.2.2.3 Coste de reposición de membranas                           | 351        |
| 8.2.2.4 Coste de personal  | 352        |
| 8.2.2.5 Coste de mantenimiento                                     | 358        |
| 8.2.2.6 Coste medioambiental                                       | 362        |
| 8.2.2.7 Coste del consumo energético                               | 366        |
| 8.2.3 Costes Totales   | 372        |
| <b>Capítulo 9. Conclusiones y nuevas líneas de investigación</b>   | <b>375</b> |
| 9.1 Conclusiones   | 377        |
| 9.1.1 Conclusiones generales                                       | 377        |
| 9.1.2 Conclusiones metodológicas                                   | 378        |
| 9.1.3 Conclusiones de análisis de resultados                       | 379        |
| 9.2 Difusión del trabajo de investigación                          | 382        |
| 9.3 Nuevas líneas de investigación                                 | 382        |
| <b>Capítulo 10. Bibliografía</b>                                   | <b>385</b> |

## INDICE DE FIGURAS

| Nº de figura.  | Pág. |
|--|------|
| 1 Esquema del proceso de M.S.F.  | 33   |
| 2 Esquema del proceso de M.E.D.  | 34   |
| 3 Esquema del proceso de C.V.  | 36   |
| 4 Esquema del proceso de O. y O.I.   | 38   |
| 5 Esquema de la membrana semipermeable                                       | 39   |
| 6 Esquema del proceso de E.D.  | 40   |
| 7 Esquema básico del proceso de O.I.   | 53   |
| 8 Esquema del proceso de O.I. con SRE  | 54   |
| 9 Esquema general del proceso de O.I.  | 56   |
| 10 Tubería de captación de agua de mar                                       | 58   |
| 11 Disposición de los filtros de arena                                       | 60   |
| 12 Disposición de los filtros de cartucho                                    | 60   |
| 13 Depósitos para dosificar los productos químicos                           | 61   |
| 14 Detalle 1 del grupo motobomba de alta presión (BAP)                       | 63   |
| 15 Detalle 2 del grupo motobomba de alta presión (BAP)                       | 63   |
| 16 Detalle de 7 líneas de producción   | 66   |
| 17 Detalle de la línea de producción   | 66   |
| 18 Esquema básico de una turbina Pelton                                      | 68   |
| 19 Esquema en la planta desalinizadora de la turbina Pelton                  | 69   |
| 20 Esquema básico de un convertor hidráulico centrífugo                      | 69   |
| 21 Esquema en la planta desalinizadora de un convertor hidráulico centrífugo | 70   |
| 22 Esquema básico del sistema Aqualyng                                       | 72   |
| 23 Esquema en la planta desalinizadora del sistema Aqualyng                  | 72   |
| 24 Esquema básico del sistema R.O.Kinetic                                    | 73   |
| 25 Esquema en la planta desalinizadora del sistema R.O.Kinetic               | 74   |
| 26 Esquema básico del sistema DWEER  | 76   |
| 27 Esquema en la planta desalinizadora del sistema DWEER                     | 76   |
| 28 Esquema básico en planta del sistema ERI-PX                               | 78   |
| 29 Esquema básico interno del sistema ERI-PX                                 | 79   |
| 30 Esquema en la planta desalinizadora del sistema ERI-PX                    | 80   |

| Nº de figura.   | Pág. |
|---|------|
| 31 Depósitos de reactivos para el postratamiento              | 85   |
| 32 Equipo dosificador de reactivo. Depósito, bomba y agitador | 96   |
| 33 Filtros de cartuchos según diámetro y tecnología           | 97   |
| 34 Membrana tipo con arrollamiento en espiral                 | 98   |
| 35 Tubo de presión de la firma Filmtec                        | 98   |
| 36 Esquema básico de modelo matemático                        | 231  |
| 37 Modelos de procesos  | 234  |
| 38 Variables del modelo                                       | 235  |
| 39 Modelos de radiación                                       | 237  |
| 40 Modelos de proceso en una cuenca                           | 237  |
| 41 Tipos de modelos   | 240  |

## INDICE DE TABLAS

| Nº de tabla.   | Pág. |
|--|------|
| 1 Características según la tecnología empleada                                     | 42   |
| 2 Clasificación de los sistemas de recuperación de energía                         | 67   |
| 3 Evolución del consumo energético total   | 80   |
| 4 Factores que intervienen en el consumo energético I                              | 82   |
| 5 Factores que intervienen en el consumo energético II                             | 83   |
| 6 Evolución del consumo energético del proceso en la última década                 | 84   |
| 7 Estructura de costes de inversión  | 91   |
| 8 Anualidades de amortización para inversión de 6.000 €                            | 93   |
| 9 Coste de los términos de potencia y energía en AT                                | 108  |
| 10 Coste total del m <sup>3</sup> de agua de mar desalinizada                      | 126  |
| 11 Coste de agua desalinizada  | 128  |
| 12 Coste total del m <sup>3</sup> de agua de mar desalinizada (c€/m <sup>3</sup> ) | 129  |
| 13 Variación del consumo energético en plantas desalinizadoras                     | 130  |
| 14 Variación de los costes totales del agua de mar desalinizada en España          | 130  |
| 15 Evaluación de costes del agua desalinizada                                      | 131  |
| 16 Distribución de costes en %   | 134  |
| 17 Plantas desalinizadoras de O.I. instaladas recientemente en Europa              | 135  |
| 18 Coste de desalinización para plantas de O.I.                                    | 136  |
| 19 Costes para diferentes producciones   | 138  |
| 20 Esquema general del planteamiento metodológico                                  | 149  |
| 21 Formulario base para la recogida de datos                                       | 150  |
| 22 Esquema para el análisis de costes  | 155  |
| 23 Proceso metodológico para el coste de inversión                                 | 156  |
| 24 Justificación del diámetro de la tubería de impulsión                           | 157  |
| 25 Justificación de la potencia de de la bomba de impulsión                        | 159  |
| 26 Volumen depósito agua de alimentación   | 160  |
| 27 Justificación del depósito de agua de alimentación                              | 161  |
| 28 Potencias de bomba de alimentación y bomba depósito a O.I.                      | 162  |
| 29 Superficies de filtración   | 164  |
| 30 Número de filtros de cartucho   | 166  |

| Nº de tabla.  | Pág. |
|---|------|
| 31 Caudales de diseño   | 167  |
| 32 Justificación de las cantidades y del depósito de hipoclorito sódico                   | 168  |
| 33 Justificación de las cantidades y del depósito de coagulante                           | 169  |
| 34 Justificación de las cantidades y del depósito de ácido sulfúrico                      | 169  |
| 35 Justificación de las cantidades y del depósito de dispersante                          | 170  |
| 36 Justificación de las cantidades y del depósito de bisulfito sódico                     | 170  |
| 37 Justificación del consumo energético con ERI-PX  | 172  |
| 38 Potencia en kW de BAP y BOOSTER  | 173  |
| 39 Justificación del número de membranas  | 174  |
| 40 Justificación del sistema de recuperación de energía                                   | 175  |
| 41 Justificación del depósito de calcita  | 177  |
| 42 Justificación de las cantidades y del depósito de hipoclorito sódico                   | 178  |
| 43 Justificación del depósito de agua tratada   | 180  |
| 44 Volumen depósito agua tratada  | 181  |
| 45 Esquema general para las instalaciones eléctricas                                      | 182  |
| 46 Potencia total y centros de transformación   | 183  |
| 47 Justificación de los conductores de cobre Cu   | 184  |
| 48 Justificación de la instalación eléctrica interior                                     | 185  |
| 49 Diámetros de la tubería de impulsión a consumidores                                    | 186  |
| 50 Potencias de las bombas de impulsión a consumidores                                    | 187  |
| 51 Superficies de las parcelas  | 188  |
| 52 Dimensiones de la planta   | 189  |
| 53 Volúmenes de hormigón  | 190  |
| 54 Dosificaciones de los reactivos y costes de los mismos                                 | 195  |
| 55 Cantidades totales de reactivos  | 196  |
| 56 Análisis inicial básico del coste de reactivos   | 197  |
| 57 Análisis inicial básico del coste de reposición de filtros de cartucho                 | 199  |
| 58 Análisis inicial básico del coste de reposición de membranas                           | 201  |
| 59 Distribución semanal de trabajo para una planta de 500-1.000-2.000 m <sup>3</sup> /día | 204  |
| 60 Distribución semanal de trabajo para una planta de 5.000 m <sup>3</sup> /día           | 205  |
| 61 Distribución semanal de trabajo para una planta de 7.500 m <sup>3</sup> /día           | 206  |
| 62 Distribución semanal de trabajo para una planta de 10.000 m <sup>3</sup> /día          | 207  |

| Nº de tabla.  | Pág. |
|---|------|
| 63 Distribución semanal de trabajo para una planta de 12.000-15.000 m <sup>3</sup> /día | 208  |
| 64 Salarios base en función de los distintos puestos, según [153]                       | 208  |
| 65 Salarios modificados en función de la experiencia                                    | 210  |
| 66 Mantenimiento. Vida media e inversión anual  | 211  |
| 67 Diámetros de la tubería de impulsión medioambiental                                  | 214  |
| 68 Diámetros de la tubería de expulsión medioambiental                                  | 215  |
| 69 Potencias de las bombas de impulsión medioambiental                                  | 216  |
| 70 Consumo energético bomba de alimentación   | 218  |
| 71 ROSA. Datos iniciales  | 219  |
| 72 ROSA. Datos característicos I  | 219  |
| 73 ROSA. Datos característicos II   | 220  |
| 74 ROSA. Parámetros de diseño   | 221  |
| 75 ROSA. Resultados obtenidos   | 221  |
| 76 Combinaciones realizadas   | 222  |
| 77 ERI-PX. Hoja de cálculo excel  | 224  |
| 78 Consumo energético en kWh/m <sup>3</sup> del proceso de O.I. (opciones diferentes)   | 225  |
| 79 Consumo energético proceso de O.I. (opción elegida)                                  | 225  |
| 80 Consumo energético procesos intermedios  | 226  |
| 81 Consumo energético proceso medioambiental  | 227  |
| 82 Consumo energético proceso de bombeo a consumidores                                  | 227  |
| 83 Resumen de las potencias de las diferentes etapas                                    | 228  |
| 84 Consumo energético de las diferentes etapas  | 228  |
| 85 Técnicas multivariantes  | 245  |
| 86 Diagrama metodológico del proceso  | 249  |
| 87 Resultados totales c€/m <sup>3</sup>   | 250  |
| 88 Resumen del procesamiento de los casos   | 263  |
| 89 Datos representativos y definitivos  | 269  |
| 90 Estadísticos descriptivos. Coste de amortización                                     | 270  |
| 91 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Coste de amortización                 | 270  |
| 92 Estadísticos descriptivos. Coste de personal   | 270  |
| 93 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Coste de personal                     | 271  |
| 94 Estadísticos descriptivos. Coste del consumo energético                              | 271  |
| 95 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Coste del consumo energético          | 271  |

| Nº de tabla.   | Pág. |
|--|------|
| 96 Estadísticos descriptivos. Coste total                      | 271  |
| 97 Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra. Coste total  | 272  |
| 98 Descriptivos. Coste de amortización                         | 272  |
| 99 Estimadores M. Coste de amortización                        | 273  |
| 100 Valores extremos. Coste de amortización                    | 273  |
| 101 Pruebas de normalidad. Coste de amortización               | 273  |
| 102 Descriptivos. Coste de personal                            | 275  |
| 103 Estimadores M. Coste de personal                           | 276  |
| 104 Valores extremos. Coste de personal                        | 276  |
| 105 Pruebas de normalidad. Coste de personal                   | 276  |
| 106 Descriptivos. Coste del consumo energético                 | 278  |
| 107 Estimadores M. Coste del consumo energético                | 279  |
| 108 Valores extremos. Coste del consumo energético             | 279  |
| 109 Pruebas de normalidad. Coste del consumo energético        | 279  |
| 110 Descriptivos. Coste total                                  | 281  |
| 111 Estimadores M. Coste total                                 | 282  |
| 112 Valores extremos. Coste total                              | 282  |
| 113 Pruebas de normalidad. Coste total                         | 282  |
| 114 Matriz de correlaciones                                    | 285  |
| 115 KMO y prueba de Bartlett                                   | 285  |
| 116 Matrices anti-imagen                                       | 286  |
| 117 Matriz de componentes                                      | 287  |
| 118 Comunalidades  | 287  |
| 119 Varianza total   | 287  |
| 120 Correlaciones reproducidas                                 | 288  |
| 121 Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones | 288  |
| 122 Varianza total   | 289  |
| 123 Matriz de componentes rotados                              | 289  |
| 124 Matriz de transformación de las componentes                | 289  |
| 125 Matriz de coeficientes para el cálculo de las puntuaciones | 290  |
| 126 Prueba de los efectos inter-sujetos. (Univariante)         | 291  |
| 127 Gran media   | 292  |
| 128 Estadísticos descriptivos                                  | 292  |

| Nº de tabla.  | Pág. |
|---|------|
| 129 Prueba de los efectos inter-sujetos                           | 292  |
| 130 Estimaciones de los parámetros                                | 293  |
| 131 Función estimable general                                     | 293  |
| 132 Pruebas de falta de ajuste                                    | 294  |
| 133 Contrast Coefficients (L´Matrix)                              | 294  |
| 134 Resumen de potencias. (MCP) (C. energético)                   | 295  |
| 135 Estadísticos del mejor modelo. Descripción                    | 296  |
| 136 Estadísticos del mejor modelo. Resumen                        | 296  |
| 137 Datos ANOVA   | 296  |
| 138 Coeficientes del modelo                                       | 297  |
| 139 Resumen de potencias. (MCP) (Filtros)                         | 297  |
| 140 Estadísticos del mejor modelo. Descripción                    | 298  |
| 141 Estadísticos del mejor modelo. Resumen                        | 298  |
| 142 Datos ANOVA   | 298  |
| 143 Coeficientes del modelo                                       | 299  |
| 144 Estadísticos descriptivos. (Univariante)                      | 299  |
| 145 Prueba de los efectos inter-sujetos                           | 300  |
| 146 Estimaciones de los parámetros                                | 300  |
| 147 Función estimable general                                     | 300  |
| 148 Pruebas de falta de ajuste                                    | 301  |
| 149 Resumen de potencias. (MCP) (C. energético)                   | 302  |
| 150 Estadísticos del mejor modelo. Descripción                    | 302  |
| 151 Estadísticos del mejor modelo. Resumen                        | 303  |
| 152 Datos ANOVA   | 303  |
| 153 Coeficientes del modelo                                       | 303  |
| 154 Resumen de potencias. (MCP) (Filtros)                         | 304  |
| 155 Estadísticos del mejor modelo. Descripción                    | 304  |
| 156 Estadísticos del mejor modelo. Resumen                        | 304  |
| 157 Datos ANOVA   | 305  |
| 158 Coeficientes del modelo                                       | 305  |
| 159 Procesamiento de datos. Producción de 500 m <sup>3</sup> /día | 306  |
| 160 Descriptivos  | 307  |

| Nº de tabla.   | Pág. |
|--|------|
| 161 Estimadores M  | 307  |
| 162 Valores extremos   | 307  |
| 163 Pruebas de normalidad  | 307  |
| 164 Procesamiento de datos. Producción de 1.000 m <sup>3</sup> /día  | 310  |
| 165 Descriptivos   | 310  |
| 166 Estimadores M  | 310  |
| 167 Valores extremos   | 311  |
| 168 Pruebas de normalidad  | 311  |
| 169 Procesamiento de datos. Producción de 2.000 m <sup>3</sup> /día  | 313  |
| 170 Descriptivos   | 314  |
| 171 Estimadores M  | 314  |
| 172 Valores extremos   | 314  |
| 173 Pruebas de normalidad  | 315  |
| 174 Procesamiento de datos. Producción de 5.000 m <sup>3</sup> /día  | 317  |
| 175 Descriptivos   | 318  |
| 176 Estimadores M  | 318  |
| 177 Valores extremos   | 318  |
| 178 Pruebas de normalidad  | 319  |
| 179 Procesamiento de datos. Producción de 7.500 m <sup>3</sup> /día  | 321  |
| 180 Descriptivos   | 322  |
| 181 Estimadores M  | 322  |
| 182 Valores extremos   | 322  |
| 183 Pruebas de normalidad  | 323  |
| 184 Procesamiento de datos. Producción de 10.000 m <sup>3</sup> /día | 325  |
| 185 Descriptivos   | 326  |
| 186 Estimadores M  | 326  |
| 187 Valores extremos   | 326  |
| 188 Pruebas de normalidad  | 327  |
| 189 Procesamiento de datos. Producción de 12.000 m <sup>3</sup> /día | 329  |
| 190 Descriptivos   | 330  |
| 191 Estimadores M  | 330  |
| 192 Valores extremos   | 330  |
| 193 Pruebas de normalidad  | 331  |

| Nº de tabla.  | Pág. |
|---|------|
| 194 Procesamiento de datos. Producción de 15.000 m <sup>3</sup> /día        | 333  |
| 195 Descriptivos  | 334  |
| 196 Estimadores M   | 334  |
| 197 Valores extremos  | 334  |
| 198 Pruebas de normalidad   | 335  |
| 199 Resultados del coste de amortización                                    | 346  |
| 200 Resultados del coste del consumo de reactivos                           | 348  |
| 201 Resultados del coste de reposición de filtros de cartucho               | 350  |
| 202 Resultados del coste de reposición de membranas                         | 351  |
| 203 Resultados del coste de personal (500 m <sup>3</sup> /día)              | 353  |
| 204 Resultados del coste de personal (1.000 m <sup>3</sup> /día)            | 353  |
| 205 Resultados del coste de personal (2.000 m <sup>3</sup> /día)            | 354  |
| 206 Resultados del coste de personal (5.000 m <sup>3</sup> /día)            | 354  |
| 207 Resultados del coste de personal (7.500 m <sup>3</sup> /día)            | 355  |
| 208 Resultados del coste de personal (10.000 m <sup>3</sup> /día)           | 355  |
| 209 Resultados del coste de personal (12.000 m <sup>3</sup> /día)           | 356  |
| 210 Resultados del coste de personal (15.000 m <sup>3</sup> /día)           | 357  |
| 211 Resultados del coste de mantenimiento                                   | 361  |
| 212 Resultados del coste de tubería de impulsión medioambiental             | 363  |
| 213 Resultados del coste de tubería de expulsión medioambiental             | 364  |
| 214 Resultados del coste de la bomba sumergible medioambiental              | 365  |
| 215 Resultados del coste medioambiental                                     | 365  |
| 216 Potencia y consumo energético total                                     | 367  |
| 217 Coste de los términos de potencia y energía en AT                       | 367  |
| 218 Resultados del coste del consumo energético                             | 369  |
| 219 Resultados del coste del consumo energético para una conversión del 42% | 370  |
| 220 Resultados del coste del consumo energético para una conversión del 45% | 371  |
| 221 Resultado del coste total   | 373  |



## INDICE DE GRAFICAS

| Nº de grafica.  | Pág. |
|---|------|
| 1 Producción (%) según la tecnología empleada                               | 42   |
| 2 Coste de la desalinización. Ósmosis inversa                               | 44   |
| 3 Producción mundial de agua desalinizada                                   | 45   |
| 4 Producción de agua de mar en las Islas Canarias                           | 46   |
| 5 Producción de agua de mar en cada Isla                                    | 47   |
| 6 Plantas desalinizadoras en las Islas Canarias                             | 47   |
| 7 Plantas desalinizadoras de O.I. en las Islas Canarias                     | 48   |
| 8 Producción de agua desalinizada en las Islas Canarias                     | 48   |
| 9 Plantas desalinizadoras según la Isla                                     | 49   |
| 10 Evolución el consumo energético. Datos obtenidos de [48]                 | 82   |
| 11 Evolución del consumo energético del proceso en la última década         | 84   |
| 12 Coste total del m <sup>3</sup> de agua de mar desalinizada               | 126  |
| 13 Costes básicos para plantas de O.I.                                      | 137  |
| 14 Costes de producción para distancias largas.                             | 138  |
| 15 Estimación de costes según la tecnología                                 | 139  |
| 16 Aplicaciones y usos del agua según sectores                              | 152  |
| 17 Esquema general de la planta   | 153  |
| 18 Datos correspondientes al consumo eléctrico y salinidad                  | 223  |
| 19 Datos correspondientes al consumo eléctrico y presión                    | 223  |
| 20 Diagrama de barras. Coste de amortización                                | 251  |
| 21 Diagrama de dispersión. Coste de amortización                            | 251  |
| 22 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de amortización                       | 252  |
| 23 Diagrama de barras. Coste de consumo de reactivos                        | 252  |
| 24 Diagrama de dispersión. Coste de consumo de reactivos                    | 253  |
| 25 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de consumo de reactivos               | 253  |
| 26 Diagrama de barras. Coste de reposición de filtros de cartuchos          | 254  |
| 27 Diagrama de dispersión. Coste de reposición de filtros de cartuchos      | 254  |
| 28 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de reposición de filtros de cartuchos | 255  |
| 29 Diagrama de barras. Coste de reposición de membranas                     | 255  |
| 30 Diagrama de dispersión. Coste de reposición de membranas                 | 256  |

| Nº de grafica.   | Pág. |
|--|------|
| 31 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de reposición de membranas   | 256  |
| 32 Diagrama de barras. Coste de personal                           | 257  |
| 33 Diagrama de dispersión. Coste de personal                       | 257  |
| 34 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de personal                  | 258  |
| 35 Diagrama de barras. Coste de mantenimiento                      | 258  |
| 36 Diagrama de dispersión. Coste de mantenimiento                  | 259  |
| 37 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de mantenimiento             | 259  |
| 38 Diagrama de barras. Coste medioambiental                        | 260  |
| 39 Diagrama de dispersión. Coste medioambiental                    | 260  |
| 40 Diagrama de cajas y bigotes. Coste medioambiental               | 261  |
| 41 Diagrama de barras. Coste del consumo energético                | 261  |
| 42 Diagrama de dispersión. Coste del consumo energético            | 262  |
| 43 Diagrama de cajas y bigotes. Coste del consumo energético       | 262  |
| 44 Diagrama de cajas y bigotes. Totalidad de costes                | 264  |
| 45 Gráfico de control. Coste de amortización                       | 265  |
| 46 Gráfico de control. Coste de consumo de reactivos               | 265  |
| 47 Gráfico de control. Coste de reposición de filtros de cartuchos | 266  |
| 48 Gráfico de control. Coste de reposición de membranas            | 266  |
| 49 Gráfico de control. Coste de personal                           | 267  |
| 50 Gráfico de control. Coste de mantenimiento                      | 267  |
| 51 Gráfico de control. Coste medioambiental                        | 268  |
| 52 Gráfico de control. Coste del consumo energético                | 268  |
| 53 Gráfico de control. Costes totales                              | 269  |
| 54 Histograma. Coste de amortización                               | 274  |
| 55 Q-Q normal. Coste de amortización                               | 274  |
| 56 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de amortización              | 275  |
| 57 Histograma. Coste de personal                                   | 277  |
| 58 Q-Q normal. Coste de personal                                   | 277  |
| 59 Diagrama de cajas y bigotes. Coste de personal                  | 278  |
| 60 Histograma. Coste del consumo energético                        | 280  |
| 61 Q-Q normal. Coste del consumo energético                        | 280  |
| 62 Diagrama de cajas y bigotes. Coste del consumo energético       | 281  |
| 63 Histograma. Coste total   | 283  |

| Nº de grafica.  | Pág. |
|---|------|
| 64 Q-Q normal. Coste total                                    | 283  |
| 65 Diagrama de cajas y bigotes. Coste total                   | 284  |
| 66 Sedimentación  | 286  |
| 67 Componentes de espacio rotado                              | 290  |
| 68 Variables dependientes. Observado, pronosticado y residual | 294  |
| 69 Variables dependientes. Observado, pronosticado y residual | 301  |
| 70 Histograma. Producción de 500 m <sup>3</sup> /día          | 308  |
| 71 Q-Q normal de coste  | 308  |
| 72 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 309  |
| 73 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 309  |
| 74 Histograma. Producción de 1.000 m <sup>3</sup> /día        | 311  |
| 75 Q-Q normal de coste  | 312  |
| 76 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 312  |
| 77 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 313  |
| 78 Histograma. Producción de 2.000 m <sup>3</sup> /día        | 315  |
| 79 Q-Q normal de coste  | 316  |
| 80 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 316  |
| 81 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 317  |
| 82 Histograma. Producción de 5.000 m <sup>3</sup> /día        | 319  |
| 83 Q-Q normal de coste  | 320  |
| 84 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 320  |
| 85 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 321  |
| 86 Histograma. Producción de 7.500 m <sup>3</sup> /día        | 323  |
| 87 Q-Q normal de coste  | 324  |
| 88 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 324  |
| 89 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 325  |
| 90 Histograma. Producción de 10.000 m <sup>3</sup> /día       | 327  |
| 91 Q-Q normal de coste  | 328  |
| 92 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 328  |
| 93 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción               | 329  |
| 94 Histograma. Producción de 12.000 m <sup>3</sup> /día       | 331  |
| 95 Q-Q normal de coste  | 332  |
| 96 Q-Q normal sin tendencia de coste                          | 332  |

| Nº de grafica.  | Pág. |
|---|------|
| 97 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción                             | 333  |
| 98 Histograma. Producción de 15.000 m <sup>3</sup> /día                     | 335  |
| 99 Q-Q normal de coste  | 336  |
| 100 Q-Q normal sin tendencia de coste                                       | 336  |
| 101 Diagrama de cajas y bigotes Coste/Producción                            | 337  |
| 102 Resultados del coste de amortización                                    | 347  |
| 103 Resultados del coste del consumo de reactivos                           | 348  |
| 104 Resultados del coste de reposición de filtros de cartucho               | 350  |
| 105 Resultados del coste de reposición de membranas                         | 352  |
| 106 Resultados del coste de personal  | 357  |
| 107 Resultados del coste de mantenimiento                                   | 362  |
| 108 Resultados del coste de medioambiental                                  | 366  |
| 109 Resultados del coste del consumo energético                             | 370  |
| 110 Resultados del coste del consumo energético para una conversión del 42% | 371  |
| 111 Resultados del coste del consumo energético para una conversión del 45% | 372  |
| 112 Resultados del coste total  | 373  |

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

|   |     |
|---|-----|
| A.C.E.C.A.U. (Agencia Canaria de Evaluación de la Calidad y Acreditación Universitaria) | 25  |
| B.A.P. (Bomba de Alta presión)  | 171 |
| B.T. (Baja Tensión)   | 183 |
| C.E.D.E.X. (Centro de Estudio y Experimentación de Materiales)                          | 211 |
| C.E.N.T.A. (Fundación Centro de Nuevas Tecnologías del Agua)                            | 211 |
| C.G.P. (Caja General de Protección)   | 185 |
| C.M.V. (Compresión Mecánica de vapor)   | 37  |
| C.T. (Centro de Transformación)   | 182 |
| C.T.V. (Compresión Termica de vapor)  | 37  |
| C.V. (Compresión de Vapor)  | 36  |
| E.D. (Electrodialisis)  | 40  |
| E.D.R. (Electrodialisis Reversible)   | 41  |
| E.R.I. (Energy Recovery Inc)  | 77  |
| F.C. (Factor de Conversión)   | 155 |
| G.O.R. (Relación entre producción de agua y consumo de vapor)                           | 33  |
| I.G.I.C. (Impuesto General Indirecto Canario)   | 107 |
| KMO (Kaiser-Meyer-Olkin)  | 249 |
| M.E./M.E.D. (Evaporación Mutiefecto)  | 34  |
| M.I.A. (Membranas de intercambio aniónico)  | 41  |
| M.I.C. (Membranas de intercambio catiónico)   | 41  |
| M.S.F. (Evaporación Súbita Multietapa)  | 32  |
| M.T. (Media Tensión)  | 182 |
| O.I. (Ósmosis Inversa)  | 38  |
| Q (Caudal)  | 155 |
| S.D.I. (Silt Density Index)   | 163 |
| S.P.S.S. (Statistical Package for the Social Sciences)                                  | 250 |
| T.D. (Tesis Doctoral)   | 25  |
| T.D.S. (Total Dissolved Solids)   | 102 |
| T.E. (Término de Energía)   | 107 |
| T.F.C. (Poliamida Aromática)  | 174 |

|  |     |
|--|-----|
| T.P. (Término de Potencia)                             | 107 |
| U.C.L.A. (Universidad de Loa Ángeles)                  | 43  |
| U.L.P.G.C. (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria) | 25  |

# **CAPITULO 1**

## **Antecedentes**



## **Capítulo 1. Antecedentes**

### **1.1 Presentación**

El objetivo de este capítulo es conocer la trayectoria académica del doctorando hasta este momento y los motivos por los cuales llegamos a la realización de dicha Tesis Doctoral (en adelante T.D.). También es objetivo de este capítulo el que sirva de ayuda inicial para la posterior comprensión de dicha T.D..

#### **1.1.1 Formación Académica**

El doctorando, José Juan Feo García, realizó sus estudios universitarios en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC).

La titulación académica es de Ingeniería Industrial, especialidad Electricidad, finalizando los estudios en el año 1996.

#### **1.1.2 Actividad Académica/Profesional/Gestión**

La actividad académica del doctorando es la de profesor asociado a tiempo parcial (ATP) desde el 11 de febrero de 2004 hasta el 11 de febrero de 2005, adscrito al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la ULPGC.

El 4 de febrero de 2005 obtiene la evaluación favorable por la Agencia Canaria de Evaluación de la Calidad y Acreditación Universitaria (ACECAU) como profesor colaborador.

A partir del 26 de octubre de 2005 es profesor colaborador temporal adscrito al Departamento de Ingeniería de Electrónica y Automática hasta el 1 de octubre de 2007, momento a partir del cual pasa a ser profesor colaborador indefinido en el mismo departamento.

Desde la fecha anterior y hasta el momento, el doctorando ha tenido una carga académica de 12 horas semanales en cada cuatrimestre.

La docencia impartida hasta el curso 2010-2011 está referida a las asignaturas de Regulación Automática, Automatización de Procesos Industriales, Optimización y Control Óptimo, Sistemas Distribuidos y Sistemas de Producción Integrados, así como una parte de Control Predictivo. Dicha docencia correspondía a las titulaciones de Ingeniería Técnica

Industrial y a los segundos ciclos de Ingeniería en Organización Industrial y Electrónica y Automática.

La docencia impartida a partir del curso 2011-2012 está referida a las asignaturas de Automatismos y Control, Regulación y Automatización Industrial e Ingeniería de Control, correspondientes a las titulaciones de grado en Tecnologías Industriales, en las menciones de Electricidad y Electrónica y Automática.

La actividad docente del doctorando está centrada en las áreas de conocimiento de ingeniería eléctrica e ingeniería electrónica y automática.

Dentro de la totalidad de los proyectos finales de carrera tutorizados, en torno a 20, y realizados en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, existen varios que están relacionados con instalaciones, consumos eléctricos y costes para plantas desalinizadoras de ósmosis inversa con sistemas de recuperación de energía.

Con respecto a la actividad profesional, en el tiempo transcurrido desde la finalización de mis estudios de Ingeniería Industrial hasta que el doctorando estaba contratado a tiempo parcial me dedicaba a ejercer el ejercicio libre de la profesión, lo cual me llevó a realizar alrededor de unos 35 expedientes anuales relacionados con instalaciones.

Dentro de la totalidad de los proyectos realizados en la etapa dedicada a ejercer el ejercicio libre de la profesión, podemos citar como más importantes los siguientes:

- a) Red de media tensión, estación transformadora y red de baja tensión para desalinizadora, cuyo peticionario fue la empresa Anfi Tauro S.A..
- b) Modificación de la potencia en la planta desalinizadora de Puerto Rico, cuyo peticionario fue la empresa Puerto Rico S.A..

En lo que a la actividad de gestión se refiere, durante los últimos 10 años, hasta febrero de 2012 he sido el tesorero del Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Canarias Oriental, dedicándome además durante 4 de ellos a dirigir el área de proyectos.

## **1.2 Programa de Doctorado**

En el año 1996, al finalizar los estudios de Ingeniería Industrial, me matriculé en el Programa de Doctorado "Tecnología Industrial", correspondiente al bienio 96/98 del Departamento de Ingeniería Mecánica, cuyo Director era el profesor Dr. D. Roque Calero Pérez. En dicho momento se realizan todos los bloques de dicho programa quedando pendiente el bloque de Trabajos de Investigación.

En octubre de 2005 se solicita la convalidación de los estudios de doctorado anteriormente realizados obteniendo la respuesta afirmativa, quedando pendiente 12 créditos a cursar correspondientes al bloque de Trabajos de Investigación y entrando en el Programa de Doctorado “Tecnología Industrial”, correspondiente al bienio 06/07 del Departamento de Ingeniería Mecánica, cuyo Director era el profesor Dr. D. José Antonio Carta González.

En el año 2007 realizo dichos cursos de investigación y se accede a obtener la Suficiencia Investigadora, obteniéndola el 7 de marzo de 2008.

### **1.3 Trámites administrativos. Unidad del Tercer Ciclo y Postgrado de la ULPGC**

El día 23 de diciembre de 2009 se presentó el documento TD-1 de solicitud del registro de la T.D. con los tutores de la misma en el registro de entrada del Departamento de Ingeniería Mecánica.

Ese mismo día obtuvimos el impreso TD-1 con registro de salida de dicho Departamento de Ingeniería Mecánica para ser llevado al registro general de la ULPGC.

El día 29 de diciembre de 2009 se presentó el documento TD-1 en el registro general de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

A partir del día 1 de septiembre de 2010 hemos ido realizando la matricula tutela de la T. D. que recogemos en este documento.

### **1.4 Estudio de la idea para la redacción de la Tesis Doctoral**

Desde que obtuve el título de Ingeniero Industrial hasta que accedí a ser profesor de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, mi vida laboral estaba dedicada a ejercer el ejercicio libre de la profesión.

Durante todo este tiempo pasaron por mis manos proyectos de diversa índole y conocí a numerosas personas relacionadas con el sector de la desalinización.

Realicé numerosas instalaciones de Estaciones Transformadoras que iban destinadas a abastecer eléctricamente a las Plantas Desalinizadoras de Ósmosis Inversa en varios municipios y de diferentes peticionarios.

Muchas veces comentaba el alto consumo eléctrico y el coste del metro cúbico de agua desalinizada, y mi sorpresa es que nadie del personal encargado de las plantas quería implicarse

en dicho asunto. Siempre me preguntaba si dicho coste se podía aminorar en función de la cantidad de membranas y su tecnología.

Análogamente, como consecuencia de la labor que había realizado durante ese tiempo, he podido obtener información confidencial sobre los datos reales de las plantas desalinizadoras de Ósmosis Inversa correspondiente a la Isla de Gran Canaria, visitándolas una por una en funcionamiento diario, observando las infraestructuras de las mismas en el año 2011 y recopilando los datos obtenidos de los años 2009, 2010 y 2011.

La labor de investigación nos ha llevado a realizar una tarea ardua y compleja durante estos 3 años como consecuencia de que no bastaba solamente en ir a visitar las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa, sino que además he tenido que ir actualizando los datos reales que se nos iban facilitando y estudiando la posibilidad de una mejora tecnológica en algunos casos y de una mejora del rendimiento en otras. Todos estos años se han ido compaginando con la labor de profesor colaborador a tiempo completo en dicha Universidad.

Como conclusión, podemos comentar que nuestro trabajo de investigación en las Islas Canarias, es de interés general, en tanto en cuanto, la producción de agua de mar desalinizada se va incrementando año tras año, el coste del agua sigue siendo elevado y el sector turístico sigue en ascenso, según información facilitada por el Gobierno Autónomo.

## **CAPITULO 2**

# **Proceso de la Ósmosis Inversa**



## Capítulo 2. Proceso de la Ósmosis Inversa

### 2.1 Consideraciones Iniciales

Planeta azul es el nombre que recibe la Tierra por su aspecto azulado debido a la cantidad de agua presente en su superficie. En ella, no sólo los recursos hídricos no se encuentran repartidos uniformemente, sino que, del volumen total existente, tan sólo el 2.5% lo es de agua dulce. De ésta, tan sólo el 0.3% puede estar razonablemente disponible.

El agua es necesaria para la vida humana. El hombre demanda agua para todas sus actividades y es tanto mayor cuanto más desarrollo se alcanza. Su escasez supone una limitación importante para el desarrollo de los pueblos debido a la dependencia que de ella tienen tanto la agricultura como la industria, o para el consumo de la población.

Tanto la escasez de agua como su mala calidad han sido una constante preocupación a lo largo de la historia. [1]

Como consecuencia de la escasez comentada anteriormente, se hace necesaria la desalinización. Dicha iniciativa fue llevada a cabo inicialmente por las organizaciones responsables del suministro de agua en países del tercer mundo, después por entidades privadas y finalmente por organismos oficiales.

Definimos la desalinización como aquel proceso mediante el cual se elimina la sal que contiene el agua de mar o el agua salobre y obtenemos un agua potable o dulce. Cuando hablamos de plantas desalinizadoras nos referimos a instalaciones industriales destinadas a desalinizar.

Existen varios tipos de técnicas de desalinización que se definen y comentan brevemente a continuación.

Los procesos de desalinización se han clasificado tradicionalmente en dos grandes grupos, en función de su tecnología básica. Estos grupo de procesos son los de evaporación (o destilación) y de membranas. Desde su inicio, se han puesto en funcionamiento muchos procesos de desalinización, pero los que tecnológicamente han sido viables a escala industrial y han tenido uso comercial en el mundo son cinco que se describen a continuación.

## **Proceso de Evaporación Súbita Multietapa (MSF)**

El proceso de evaporación súbita multietapa, se llama también proceso multietapa flash, MSF. Es el proceso más antiguo a nivel industrial, y continúa extendido desde el punto de vista de su capacidad a nivel de producción mundial.

El proceso se basa en la ebullición de agua en un evaporador de numerosas cámaras que operan a temperaturas y presiones progresivamente decrecientes. Con ello se consigue evaporar agua en cada una de las etapas, para formar el conjunto de la producción total.

Según parece, el proceso se desarrolló a la misma vez por Silver y Frankel en 1957 y la primera planta de evaporación súbita comercialmente hablando se instaló en Kuwait en 1960.

Dicho proceso se está dejando de utilizar como consecuencia del alto consumo energético aunque sigue siendo muy utilizado en países del Golfo Pérsico. [2-3]

En el sistema MSF el agua que se desaliniza se calienta a baja presión lo que hace que ocurra una evaporación súbita. Este proceso lo repetimos varias veces, a modo de etapas, en las que la presión va disminuyendo.

Dicho sistema es adecuado para aguas con alta salinidad, temperatura y contaminación. La capacidad de producción es mucho mayor que la de otras técnicas.

Los componentes principales de una planta de destilación MSF son los siguientes:

- Pretratamiento
- Evaporador multietapas MSF.
- Calentador principal.
- Eyectores de vacío.

El método está basado en que al ir reduciendo drásticamente la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de equilibrio, ocurre una evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma. Solo una pequeña parte se evapora. La producción de la planta la logramos mediante las sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente. Esto lo logramos introduciendo el agua de mar, ya calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash de forma tal que provocamos una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada.

El vapor que se produce pasa a través de mallas donde pierde los restos de salmuera que lleva consigo.



Figura 1. Esquema del Proceso de MSF. [4]

El agua precalentada en esta primera etapa se lleva a una cámara o zona de calentamiento y elevamos su temperatura entre 90-110°C, llamada temperatura “top”. En este tipo de proceso existe un factor llamado GOR que es la relación entre la producción de agua y el consumo de vapor.

El agua ya calentada pasa a otra cámara de intercambiadores-condensadores, donde en su interior bajo está la cámara flash que provoca la evaporación parcial del agua. Las presiones van siendo menores, siendo la correspondiente a la de saturación del agua que inicia el proceso de ebullición. El vapor se condensa en los tubos que atraviesan esta cámara. El condensado se envía a la etapa siguiente y volvemos a repetir el proceso de evaporación condensación. Este proceso repetido en varias etapas, con menor presión entre ellas, hace que se obtenga un agua desalinizada con una salinidad menor de 50 mg/l, sabiendo que el agua de alimentación inicial tiene más de 50.000 mg/l.

Las plantas de MSF se suelen fabricar para un rango de GOR sobre 11:1. El valor adecuado suele ser entre 7 y 9 dependiendo del costo de la energía. Una planta típica, con un GOR de 8:1, podría tener de 16 a 28 etapas con el precalentamiento del agua y 3 con extracción de calor con descarga al medio.

Las plantas de MSF las podemos construir con configuraciones del tipo “once-through”, o sea de un paso sin la recirculación del agua precalentada.

El esquema correspondiente a la figura 1 pertenece a una planta de MSF del tipo “once-through”. [4]

## Proceso de Evaporación Multiefecto (ME)

El proceso de evaporación multiefecto, ME o MED, es muy parecido al de evaporación multietapa.

El proceso es similar, donde la evaporación de agua se produce en los tubos de un evaporador que trabaja con temperaturas y presiones decrecientes.

El proceso se ha utilizado hace muchísimo años por la industria química, y a finales del siglo XX es cuando ha empezado a tener su aplicación en la desalinización de agua de mar. [2-3]

En el proceso MED el agua que queremos desalinizar pasa por evaporadores colocados en serie.

Los componentes que tienen la instalación MED, son los siguientes:

- Pretratamiento.
- Evaporador multiefecto MED.
- Sistema de evacuación de gases no condensables.

La diferencia entre el proceso MED y el MSF se basa en la manera de evaporar. En las plantas MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada, donde la evaporación se realiza de forma natural, logrando mejores valores de transferencia de calor que en las plantas de MSF donde la evaporación es súbita, en forma directa. Figura 2.

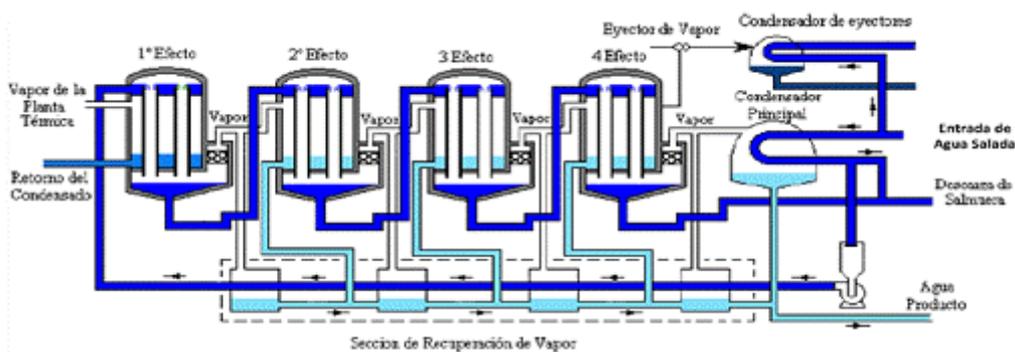


Figura 2. Esquema del Proceso de MED. [4]

La técnica de MED evapora en etapas seguidas. La primera etapa se alimenta con vapor externo entre 70° y 80° y en el resto de las etapas se utiliza el calor de condensación del vapor producido por la etapa anterior. De esta manera elevamos la temperatura del agua en torno a unos 22°C, lo que implica un aumento de 2 a 3 grados en cada una de las etapas, hasta alcanzar la temperatura del vapor de alimentación. A la misma vez el agua desalinizada pierde temperatura hasta igualar, en la salida del proceso, a la del mar.

En el proceso MED el agua de mar se deposita finamente sobre los tubos del evaporador donde se forma la película delgada que comentamos anteriormente, la cual favorece su rápida ebullición y evaporación. El vapor se envía al interior de los tubos evaporadores del efecto siguiente, el cual trabaja a temperaturas y presiones menores al anterior efecto. La salmuera que tenemos en el primer efecto se lleva al efecto siguiente donde se rocía formando una película delgada sobre la superficie de los tubos por los que circula el citado vapor repitiendo el proceso de evaporación. El vapor que se va obteniendo en cada uno de los efectos se va convirtiendo en agua desalinizada. El proceso lo repetimos en función del número de efectos que tenga el sistema.

El número de efectos va definido en función de la temperatura total disponible y la diferencia de temperatura mínima requerida entre los efectos. La temperatura de salida del último efecto se llama temperatura "*bottom end*" y está afectada por la temperatura del agua de refrigeración disponible. La temperatura del primer efecto que se llama temperatura "*top*" está afectada por las probables incrustaciones de acuerdo a la calidad del agua de mar disponible.

Las plantas de MED, se fabrican para funcionar a baja temperatura en el primer efecto, del orden de 65 a 70°C, limitando la formación de incrustaciones.

El GOR de la planta de MED es igual al número de efectos menos uno (N-1). Para un GOR de 8:1, el número de efectos sería 9. El consumo eléctrico en una planta MED es menor que el que se produce en una planta MSF ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de salmuera.

El coste económico en una planta MED es mayor que MSF, pero la planta es más sencilla de trabajar y tiene un coste de operación menor. El sistema MED se ha utilizado fundamentalmente en plantas de tamaño medio. [4]

## Proceso de Compresión de Vapor (CV)

Otro de los procesos de evaporación que se ha utilizado para desalinizar agua es la compresión de vapor. En este proceso el sistema tiene un compresor dentro, que es el que hace que aumente la presión y temperatura del vapor producido por el evaporador. En este caso, los sistemas de compresión de vapor suelen ser de simple efecto y en algunos casos de doble efecto.

El proceso se utilizó comercialmente a partir de los años 1970. Presentan dos variantes según la compresión sea mecánica o térmica y según se utilice electricidad o vapor de baja/media presión.

La limitación para este sistema es la capacidad del compresor además de que el consumo energético es muy alto como consecuencia del consumo del mismo. [2-3]

La secuencia básica de un sistema de compresión de vapor comprende las siguientes etapas:

- Pretratamiento.
- Intercambiadores de calor.
- Eliminación de gases no condensables.
- Evaporador: Cámara principal, Tubos de evaporación - condensación.
- Compresor.
- Postratamiento.

La evaporación se produce en la parte baja de la cámara, eliminación antes los gases que no se pueden condensar mediante una bomba. Los vapores los extrae el compresor, que los hace circular por el interior de los tubos condensadores. Ver figura 3.

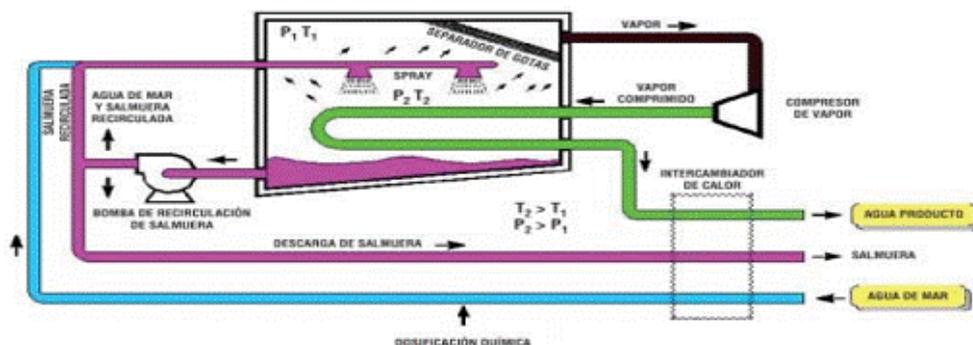


Figura 3. Esquema del Proceso de CV. [4]

Cuando el vapor se comprime, aumenta su temperatura de condensación y, al enfriar el condensador con el agua evaporante, se condensan los vapores y el agua dulce así obtenida se extrae del evaporador con la bomba de producto. Para mantener la salinidad constante en el interior del evaporador parte de la salmuera refrigerante se envía al mar. Para compensar la salmuera y producto extraídos hay que introducir agua de mar. Como el agua de mar es fría y la salmuera y producto están calientes, se les hace pasar por un intercambiador y así se recupera gran parte de su energía calorífica.

En la evaporación con compresión de vapor (CV) el calor necesario para llevar el agua de mar a ebullición se obtiene directamente del vapor que es removido del evaporador y reinyectado en la primera etapa después de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación.

Como se expuso al inicio, la compresión del vapor puede ser realizada a través de compresores mecánicos o térmicos, lo que hace que las plantas se denominen plantas de CMV o de CTV.

En las plantas de CMV la energía que se entrega al sistema, a través del compresor, es la que define el aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. En una planta eficiente con bajo ingreso de energía, la diferencia de temperatura para la evaporación es pequeña, lo que implica que se necesite una gran área superficial para la evaporación y por tanto grandes costos iniciales.

Las plantas de CMV se fabrican con evaporadores con tubos verticales, tubos horizontales y del tipo de platos, similares a los de las plantas de MED. Las variaciones a la hora de trabajar están afectadas por una evaporación a alta temperatura o a baja temperatura.

El proceso CTV es muy parecido al proceso CMV. Las plantas incluyen evaporadores con tubos verticales, tubos horizontales y de platos, al igual que las plantas CMV. Las plantas de CTV se suelen construir con muchos efectos para lograr eficacias globales razonables. Las variaciones a la hora de operar son evaporación a alta temperatura o a baja temperatura, aunque las de baja temperatura son las plantas de CTV que se usan normalmente y abundantemente.

Como consecuencia de que no existen compresores volumétricos de vapor de baja presión de gran tamaño, no se puede alcanzar grandes producciones. Debido a esto, las plantas de CV suelen llegar a una producción sobre 5.000 m<sup>3</sup>/día. [4]

## Proceso de Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis es un proceso que, en breves palabras, podemos resumir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se unen mediante una membrana semipermeable, existe una circulación de la solución menos concentrada hacia la más concentrada para igualar las concentraciones finales. La diferencia de altura entre las soluciones se traduce en una diferencia de presión a la cual se le denomina presión osmótica.

Cuando aplicamos una presión externa superior a la presión osmótica, hacemos que la circulación de la solución sea de la más concentrada hacia la menos concentrada y por tanto hemos invertido el proceso.

El proceso invertido mediante la aplicación de la presión exterior es lo que denominamos **Ósmosis Inversa**. [2-3]

Al igual que las moléculas de un gas ideal, las partículas de soluto están muy distantes en las soluciones diluidas y no interaccionan en forma significativa entre sí. Para soluciones diluidas, la presión osmótica,  $\pi$ , tiene la siguiente expresión:

$$\pi = nRT/V$$

donde  $n$  es el número de moles del soluto,  $V$  es el volumen de la solución (en litros),  $R$  es la constante general de los gases y  $T$  la temperatura en  $^{\circ}\text{K}$ . Dado que  $n/V$  corresponde a una expresión de concentración, la ecuación anterior toma la forma de:

$$\pi = MRT$$

donde  $M$  corresponde a la concentración de la solución expresada en moles/litro, es decir, la molaridad de la solución.

Cuando al proceso aplicamos una presión en la solución más concentrada, el movimiento se produce de la solución más concentrada a la solución mas diluida. Este proceso es lo que constituye la Ósmosis Inversa. En la figura 4, se pueden observar los procesos.

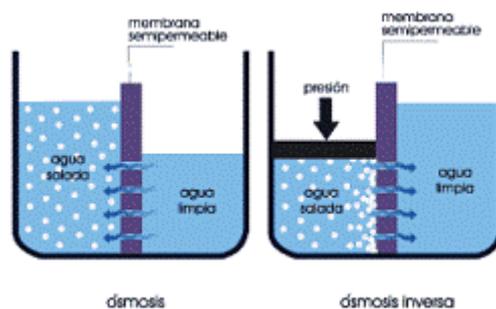


Figura 4. Esquema del Proceso de O. y O.I. [4]

Como resultado de lo anterior, **para desalinizar agua por ósmosis inversa** es preciso disponer de una membrana semipermeable, figura 5, y de una fuerza exterior que impulse el agua a través de la membrana.

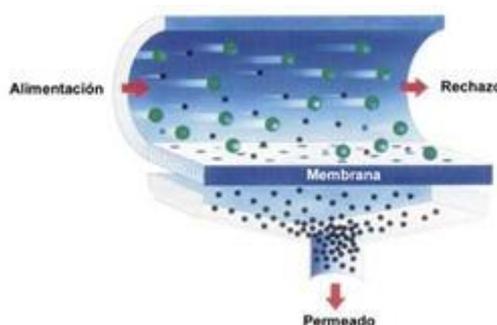


Figura 5. Esquema de la membrana semipermeable. [4]

En comparación con los anteriores procesos, la osmosis inversa es un proceso relativamente nuevo. Su inicio en el mercado fue a principios de los años 70 del siglo pasado para agua salobre y para agua de mar a finales de esa misma década.

Como hemos comentado anteriormente, la ósmosis inversa utiliza la presión para forzar el agua a través de una membrana especial, dejando atrás las sales disueltas en el lado de alimentación de la membrana. Los sistemas de ósmosis inversa se fabrican fundamentalmente con cuatro tipos de membranas, plana, tubular, arrollamiento en espiral y fibra hueca. Las dos últimas son las que se encuentran en la mayoría de las plantas desalinizadoras. Las presiones de trabajo y la pureza del producto varían con la concentración salina del agua a tratar y las membranas empleadas.

En las plantas desalinizadoras de agua de mar que utilizan esta tecnología, el factor de conversión está entre el 42 y 45% cuando utilizan en el proceso de desalinización una sola etapa. La calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300-500 mg/l. La salmuera o agua de rechazo es normalmente devuelta al mar.

Debido a su flexibilidad en el diseño, los sistemas ósmosis inversa se utilizan para pequeñas y grandes producciones. La mejora de la tecnología de las membranas ha hecho que sea el proceso que más se utiliza para desalinizar agua de mar actualmente. [4]

## Proceso de Electrodiálisis (ED)

La electrodiálisis es un proceso nuevo, que está indicado para la desalinización de aguas salobres cuya energía es la eléctrica y de corriente continua. Se basa en el principio de la electrólisis, introduciendo las membranas entre los dos electrodos.

Dentro de la desalinización en general, la electrodiálisis es el proceso menos conocido.

Evidentemente en todo esto existen motivos comerciales y tecnológicos. En cuanto a la parte tecnológica nos referimos al consumo de energía, que como sabemos, implica un coste muy elevado lo que hace que esta tecnología sea poco adecuada para agua de mar. Por otro lado la industria tiene pocos fabricantes y suministradores de membranas para sistemas de electrodiálisis, lo que implica una mínima expansión comercial. [2-3]

La electrodiálisis está basada en que si pasamos una corriente eléctrica continua a través de una solución iónica, los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Si entre ambos electrodos se colocan dos membranas semiimpermeables que permitan selectivamente solo el paso del  $\text{Na}^+$  o del  $\text{Cl}^-$ , el agua que se encuentra en la celda electrolítica se desaliniza obteniéndose agua dulce.

El proceso lo podemos interpretar adecuadamente en la figura 6, donde los iones van a los canales atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en celdas de dilución, el agua pura y en el resto, celdas de concentración, el agua salada.

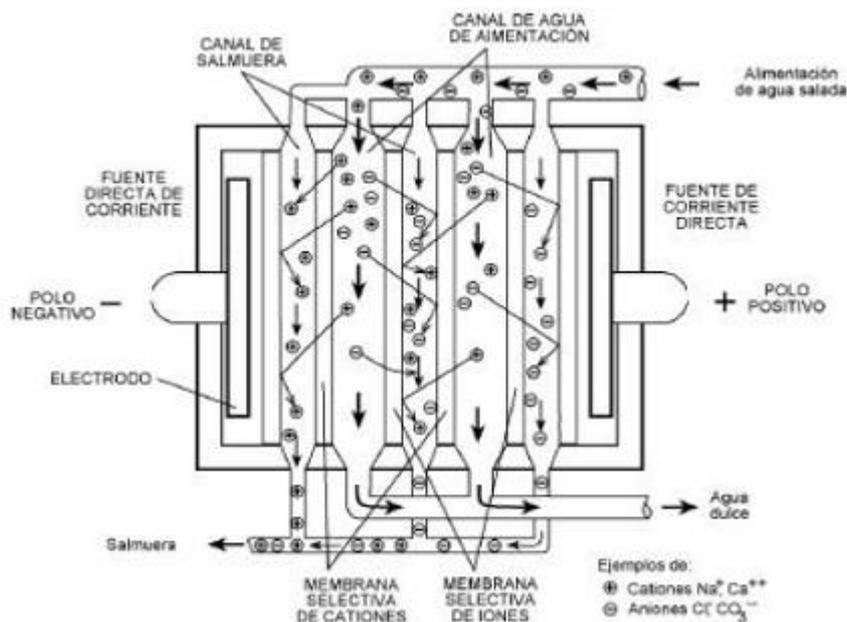


Figura 6. Esquema del Proceso de ED. [4]

En muchas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas. Entonces hablamos de electrodiálisis reversible (EDR).

La electrodiálisis Reversible (EDR) es una versión de la electrodiálisis en la que se invierte la polaridad de los electrodos varias veces por hora, lo que induce una autolimpieza química. De esta manera el proceso de la electrodiálisis permite desalinizar agua con recuperaciones muy elevadas del orden del 90%.

La parte más importante del proceso se conoce como par de célula y está compuesto por dos membranas de intercambio iónico, que permiten de forma selectiva la transferencia de cationes y aniones entre los espacios que separan las membranas y permiten la distribución del agua sobre la superficie de las membranas. La acumulación en paralelo de hasta 600 pares de células constituye lo que se conoce como pila de membranas (una pila típica de ED usada a nivel industrial puede tener entre 500 y 2.000 pares de células).

Las membranas permeablemente selectivas a los cationes reciben el nombre de membranas de intercambio catiónico (MIC), mientras que las que son selectivas al paso de aniones son llamadas membranas de intercambio aniónico (MIA). Esta selectividad es consecuencia de la presencia de cargas iónicas fijadas en la matriz de la membrana.

El agua que se ha desalinizado mediante este proceso debe recibir el tratamiento adecuado para eliminar compuestos orgánicos. Debido a que el agua de alimentación no pasa físicamente a través de las membranas en estos sistemas, la mayoría de contaminantes orgánicos no son eliminados. Este proceso sólo puede separar sustancias que están ionizadas.

El agua de alimentación es prefiltrada, para reducir la turbidez. Las membranas se mantienen limpias mediante la inversión periódica de la polaridad del sistema, lo cual causa un flujo iónico en la dirección opuesta y reduce las acumulaciones.

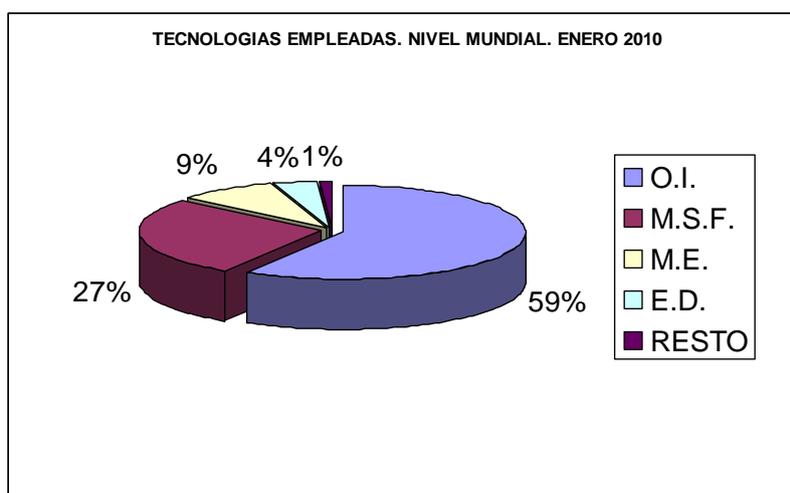
Los procesos de electrodiálisis y de inversión de electrodiálisis necesitan grandes cantidades de energía para producir la corriente eléctrica. Son procesos que se utilizan para la desalinización de aguas salobres pero que tengan una baja salinidad. Por estos motivos, este proceso no se suele utilizar para desalinizar aguas a gran escala. Sin embargo, se suelen utilizar en sistemas pequeños y por lo general funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento. [4]

A continuación se inserta la tabla 1, donde se indican las características fundamentales, en la cual podemos observar las diferencias y similitudes entre las cinco tecnologías comentadas anteriormente. En el mismo se puede observar que la tecnología de la ósmosis inversa presenta en su globalidad unas características bastante asequibles en comparación al resto de tecnologías.

| CARACTERISTICAS                      | M.S.F.   | M.E.       | C.V.      | O.I.      | E.D.      |
|--------------------------------------|----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Energía</b>                       | Térmica  | Térmica    | Eléctrica | Eléctrica | Eléctrica |
| <b>Consumo Energético</b>            | Alto     | Alto/medio | Medio     | Bajo      | Bajo      |
| <b>Costo Instalaciones</b>           | Alto     | Alto/medio | Alto      | Medio     | Medio     |
| <b>Capacidad de Producción</b>       | Alta     | Media      | Baja      | Alta      | Media     |
| <b>m<sup>3</sup>/día</b>             | > 50.000 | < 20.000   | < 5.000   | > 50.000  | < 30.000  |
| <b>Posibilidad de ampliación</b>     | difícil  | difícil    | difícil   | fácil     | fácil     |
| <b>Fiabilidad de operación</b>       | alta     | media      | baja      | alta      | alta      |
| <b>Desalinización de agua de mar</b> | si       | si         | si        | si        | no        |
| <b>Calidad del agua desalinizada</b> | alta     | alta       | alta      | media     | media     |
| <b>(mg/l)</b>                        | < 50     | < 50       | < 50      | 300 – 500 | < 300     |
| <b>Superficie requerida</b>          | mucha    | media      | poca      | poca      | poca      |

Tabla 1. Características según la tecnología empleada. [5]

Como sería de rigor, vamos a observar en la siguiente gráfica 1, como están distribuidos los porcentajes de producción, a nivel mundial, en función de la tecnología empleada. Evidentemente, la tecnología basada en la ósmosis inversa es la que más se utiliza.



Gráfica 1. Producción (%) según la tecnología empleada. [6]

Una vez que hemos llegado a este punto, entendemos que es importante comentar brevemente cual ha sido la evolución desde sus inicios de la ósmosis inversa en el mundo.

Según los antecedentes [7], J.A. Nollet fue quien descubrió en 1748 el fenómeno de la ósmosis. Posteriormente en 1867 Traube realizó las primeras experiencias. [7]

Durante los siguientes cien años, determinados científicos, Pfeffer, Morse, Hartley, Findlay, Van't Hoff., Gibbs, Loeb y Sourirajan han estudiado la ósmosis en todos sus aspectos, desde sus membranas hasta las soluciones diluidas. [8]

A partir de 1962, en la Universidad de Los Angeles, California (UCLA), se construyen y ensayan las primeras plantas piloto donde se produce 2 m<sup>3</sup>/día de agua desalinizada. [9]

En 1962, **John F. Kennedy**, presidente de los Estados Unidos de América, manifestaba **“Si pudiéramos producir agua potable a bajo coste a partir del agua de mar, sería un auténtico servicio a la humanidad que eclipsaría cualquier otro logro científico”**. [1]

En 1965 la misma Universidad de Los Angeles, (UCLA), construye otra planta que produce 20 m<sup>3</sup>/día. El 4 de junio de 1965 el agua suministrada por la planta sirve como agua potable en la Ciudad de Coalinga (California), se estaba delante de la primera planta desalinizadora del mundo. [10-12]

En 1978 se construye la primera gran planta de Ósmosis Inversa para agua de mar, en Jeddah, Arabia Saudí. [13-18]

En febrero de 2006 entró en funcionamiento en Israel la segunda fase de la mayor desalinizadora del mundo. Dicha desalinizadora se encuentra ubicada en la ciudad de Ashkelon y está diseñada para producir 330.000 m<sup>3</sup>/día mediante 32 módulos de ósmosis inversa que son suficientes para atender a una población de 1.400.000 habitantes. Con ello se trata de paliar el problema del agua del estado hebreo.

La desalinizadora de Ashkelon, formada por dos líneas idénticas, tiene una capacidad de producción de 108 millones de m<sup>3</sup> al año. Dicha planta produce agua de alta calidad a un coste muy competitivo de 0,5 €/m<sup>3</sup>.

Dicha planta presentó en su momento un sistema novedoso en cuatro etapas para la eliminación del boro hasta los niveles exigidos. Asimismo posee un sistema de recuperación de energía tras el bombeo de alta presión y el paso por la membrana.

Sobre estas fechas también se inauguró la ampliación de la desalinizadora por ósmosis inversa de Alicante teniendo una capacidad de producción de 64.000 m<sup>3</sup>/día. Los caudales aportados se consumen directamente en poblaciones como Alicante, Elche y Santa Pola.

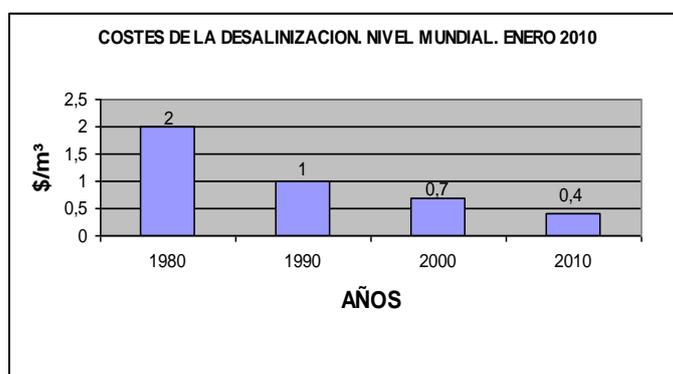
Estos datos ponen de manifiesto la importancia que está adquiriendo la utilización de desalinizadoras en su contribución para paliar el problema de la escasez de agua en España y en el mundo. [19]

Dentro de la desalinización, la evolución tanto de la capacidad productora, como del coste de producción hace de la ósmosis inversa una opción a tener muy en cuenta.

Lógicamente, la desalinización de agua es muy importante en el siglo XXI, en tanto en cuanto el agua es un bien escaso y como consecuencia del tiempo, los cambios climáticos y la escasez de agua en los embalses, hace de la desalinización una realidad en los tiempos en que nos encontramos.

Como consecuencia de esto, los gobiernos deberían obligar a que los alojamientos turísticos en las islas o países con cercanía al mar obtengan agua mediante la desalinización.

Evidentemente, los costes de esta agua desalinizada tienen mucho que ver en ese futuro de la desalinización, puesto que no se puede desalinizar agua a cualquier precio ni de cualquier manera. A continuación presentamos un gráfico, tipo diagrama de barras, donde se puede observar la evolución de los mismos, dicho gráfico pertenece al proceso de la ósmosis inversa. Evidentemente, según el autor de la gráfica siguiente, el valor del 2010 era una previsión del mismo.



Gráfica 2. Coste de la desalinización. Ósmosis inversa. [20]

Como podemos observar en el diagrama de barras de la gráfica 2, en los últimos 30 años los costes de la desalinización han experimentado una espectacular caída, notándose que entre 1980 y 1990 dichos costes descendieron un 50%. También se aprecia que en las 2 últimas décadas el descenso ha sido menor pero siempre entorno al 30%.

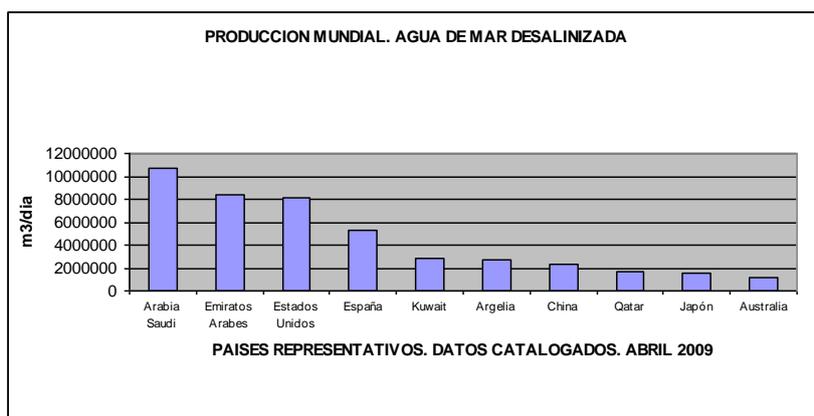
Hasta el año 1980, las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa no tenían sistemas de recuperación de energía, de ahí que el coste del metro cúbico de agua fuese tan elevado.

A partir de los años 80, se inicia la recuperación de la energía a base de múltiples intercambiadores de calor y turbinas de contrapresión.

El año 1993 es básico para optimizar aún más la recuperación de la energía. Se inician sistemas de recuperación mediante las turbinas Pelton y se observa como el coste disminuye hasta valores de 0,7 \$/m<sup>3</sup>. A partir de esos años la recuperación de la energía es fundamental y prioritaria en la desalinización de agua de mar mediante la ósmosis inversa y entran a formar parte de la misma los intercambiadores de presión y los convertidores hidráulicos, tanto los centrífugos como los dinámicos.

En dicho artículo [20], se presenta una pequeña previsión, en la cual se ponía de manifiesto que se preveía el coste para el año 2010 de 0,4 \$/m<sup>3</sup>. [20]

Tras Arabia Saudita, los Emiratos Árabes y Estados Unidos, España es el cuarto productor mundial de agua, según la gráfica 3, utilizando la tecnología de la desalinización de O.I. y una de las principales potencias mundiales en empresas de ingeniería especializadas en dicha tecnología y en la construcción de instalaciones desalinizadoras. [6]



Gráfica 3. Producción mundial de agua desalinizada. [6]

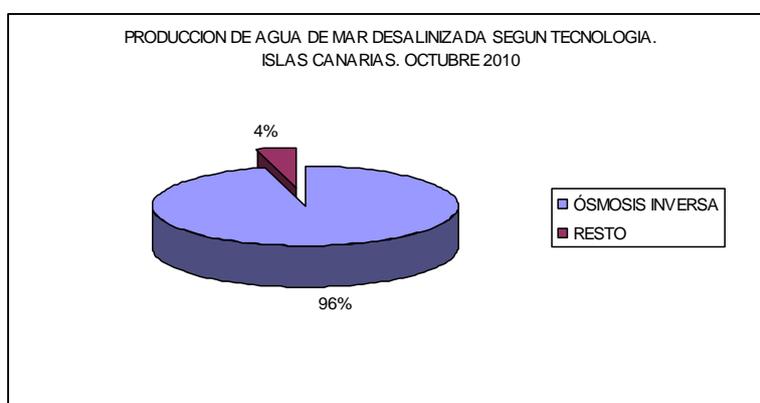
## 2.2 La desalinización en España/Islas Canarias

Las Islas Canarias son pioneras en la desalinización en España, de hecho, la primera planta desalinizadora de agua de mar en las Islas Canarias y por tanto de España se instaló en la Isla de Lanzarote en 1964. Dicha planta producía 2.500 m<sup>3</sup>/día de agua potable, si bien utilizaba como proceso tecnológico la M.S.F..

Canarias es la Comunidad Autónoma con mayor capacidad de producción de agua mediante la desalinización por ósmosis inversa, absorbiendo en el año 2004 el 38% de la

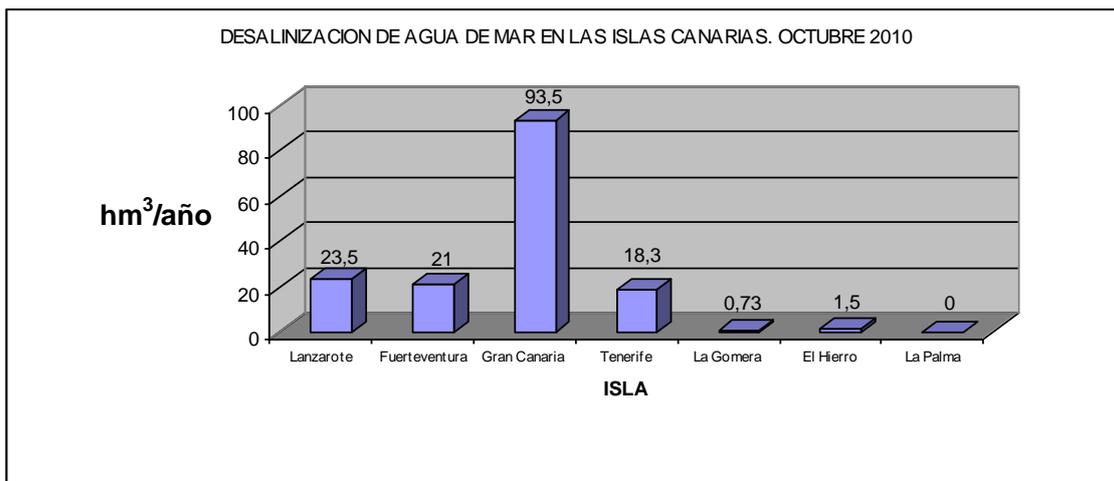
capacidad instalada total en el país, frente a la cifra cercana al 14,5% de Andalucía. A continuación se situaba la Comunidad Valenciana y Murcia, con participaciones del 14% y del 13,5%, respectivamente, mientras que las plantas existentes en Baleares contaban con algo menos del 10% de la capacidad de desalinización total. [21]

Ha sido precisamente en ésta última década cuando, gracias al desarrollo de la tecnología, se han conseguido grandes avances y, en consecuencia, un auge nunca antes conocido. La tecnología de la Ósmosis Inversa se ha desarrollado muchísimo durante esta época. En particular en las Islas Canarias, que ha servido de modelo para el resto del territorio español, más del 95% del agua desalinizada utiliza la técnica de la Ósmosis Inversa. Gráfica 4.



El esfuerzo de las distintas administraciones públicas y de la iniciativa privada ha permitido una producción actual de 588.057 m<sup>3</sup>/día, en todo el archipiélago. El crecimiento económico experimentado en las islas orientales no se hubiese producido sin la desalinización de agua de mar. Gracias a ello el agua deja de ser un factor limitativo del desarrollo. [23]

En octubre 2010, según la gráfica 5, la producción de agua de mar desalinizada era de 158,53 hm<sup>3</sup>/año, con la siguiente distribución de producción según la Isla:

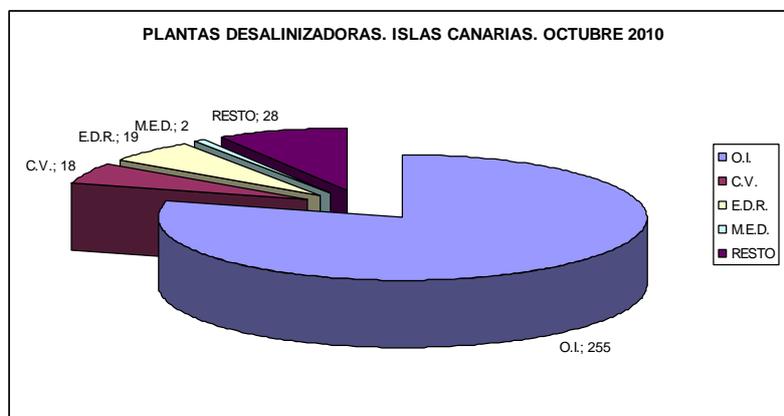


Gráfica 5. Producción de agua de mar en cada Isla. [22]

Según las previsiones del Gobierno de Canarias, existirá una producción de agua desalinizada en torno a los 188 hm<sup>3</sup> en el año 2013. Para dicho año se estima que el coste del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada oscile entre 0,5 y 0,6 €/m<sup>3</sup>. [23]

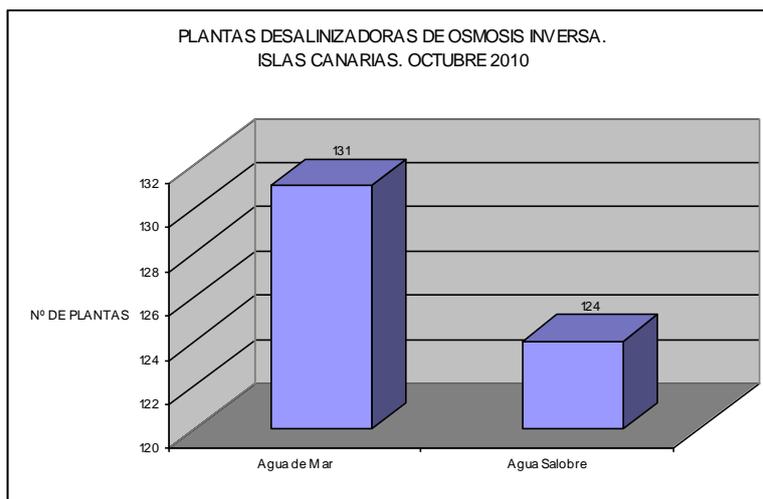
Aunque el desarrollo tecnológico posibilita la construcción de plantas cada vez de mayor tamaño, cerca de la mitad de las desalinizadoras que se encuentran en funcionamiento tienen una capacidad inferior a 500 m<sup>3</sup> diarios, mientras que el 7% tan sólo puede desalinizar más de 20.000 m<sup>3</sup> de agua diario.

Dentro de las tecnologías actuales de desalinización, la Ósmosis Inversa se ha erigido como la tecnología mas consolidada por ser la más barata y eficiente como consecuencia de su menor consumo de energía y espacio. A continuación se expone la gráfica 6, donde se observa el número de plantas desalinizadoras en las Islas Canarias según el tipo de tecnología empleada.



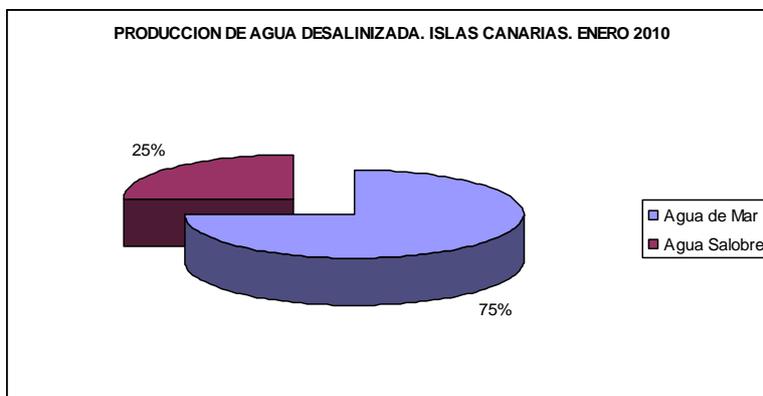
Gráfica 6. Plantas desalinizadoras en las Islas Canarias. [22]

De la totalidad de las plantas desalinizadoras, es decir, del total de 322 observamos que 255 utilizan la tecnología de la ósmosis inversa. Eso implica que la ósmosis inversa se usa en más del 80% de las instalaciones. De estas 255 plantas que utilizan la ósmosis inversa, 131 pertenecen a la desalinización de agua de mar, mientras que 124 pertenecen a la desalinización mediante agua salobre según podemos observar en la gráfica 7 que se adjunta.



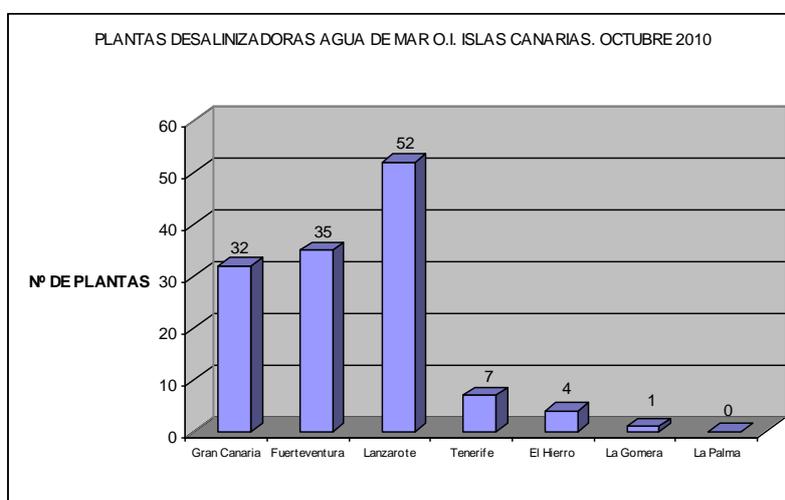
Gráfica 7. Plantas desalinizadoras de O.I. en las Islas Canarias. [22]

Aunque inicialmente podría interpretarse que la producción de agua desalinizada entre agua de mar y salobre estarían a la par, mediante la siguiente gráfica 8 queda demostrado que el 75% de esa agua desalinizada proviene del agua de mar y que un 25% proviene de agua salobre. Dicha agua desalinizada de mar, evidentemente se usa en el sector turístico y residencial.



Gráfica 8. Producción de agua desalinizada en las Islas Canarias. [22]

Inicialmente, entiendo que la distribución de las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante ósmosis inversa debería ser proporcional a cada Isla, en función de la climatología, la pluviometría, los embalses, la zona de costa que cada una tuviese y los complejos turísticos y residenciales que estén en funcionamiento teniendo en cuenta el medio plazo. Evidentemente, como consecuencia de que en las Islas Occidentales, Tenerife, la Palma, la Gomera y el Hierro la pluviometría es mayor, observamos que la gráfica 9 de barras, nos muestra la distribución de las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante ósmosis inversa distribuidas según la Isla, y se observa que las islas orientales son las que tienen más plantas instaladas, siendo obvio la pequeña cantidad de plantas instaladas en las islas occidentales.



Gráfica 9. Plantas desalinizadoras según la Isla. [22]

Según la información facilitada por el Centro Canario del Agua, la mayoría de estas plantas son de pequeña capacidad y con una ocupación de suelo mínima.

Este tipo de plantas desalinizadoras modulares constituye una solución ideal para abastecimiento de agua potable a hoteles, campos de golf, complejos residenciales, etc.

El diseño modular permite la adaptación de la planta a cualquier tipo de cliente. Desde plantas pequeñas de 200 m<sup>3</sup>/día hasta plantas con una producción de 3.000 m<sup>3</sup>/día, todo ello con la ventaja de obtener la máxima calidad con unos costes reducidos. Las ventajas claves de dicha estandarización del proceso se pueden resumir en la tecnología de bajo coste, máximos niveles de calidad, control automatizado del proceso y mejora de la eficiencia energética.

## 2.3 Parámetros Generales en Plantas Desalinizadoras de O.I.

En este apartado de la T.D. vamos a estudiar los parámetros de funcionamiento en una planta desalinizadora de Ósmosis Inversa que afectan directamente a los costes de dichas plantas y que son los siguientes:

### 2.3.1 Caudales de agua y concentraciones

Los caudales de agua están divididos en un caudal de entrada (alimentación) y dos caudales de salida (permeado y concentrado), en base a la figura 7.

Según esto, tenemos la siguiente relación:

$$Q_a = Q_p + Q_r$$

Donde:

$Q_a$  es el caudal de alimentación en  $m^3/día$

$Q_p$  es el caudal de permeado en  $m^3/día$

$Q_r$  es el caudal del concentrado o rechazo en  $m^3/día$

Aplicando la anterior relación a las concentraciones y realizando un balance de materia obtenemos la ecuación siguiente:

$$Q_a \times C_a = Q_p \times C_p + Q_r \times C_r$$

Donde  $C_a$ ,  $C_p$  y  $C_r$  corresponde a las cantidades de concentración del agua de alimentación de permeado y de concentrado en  $mg/l$ .

### 2.3.2 Ecuación de transporte del agua

El caudal de agua que atraviesa la membrana está definido mediante la siguiente relación:

$$Q_a = A \times (P_m - \Delta\Phi_m)$$

Siendo:

$Q_a$  el caudal de agua que atraviesa la membrana en  $l/m^2h$

$A$  el coeficiente de transporte de la membrana en  $l/m^2hatm$

$P_m$  la presión diferencial de la membrana en atm

$\Delta\Phi_m$  la presión osmótica diferencial a ambos lados de la membrana en atm

### 2.3.3 Factor de conversión

Es el cociente entre el caudal de agua producto y el caudal de agua de alimentación. Se expresa en tanto por ciento (%) y nos indica la cantidad de agua desalinizada que vamos a obtener partiendo de una cantidad de agua bruta de alimentación.

$$F_c(\%) = (Q_p/Q_a) \times 100$$

Por lo general, cuando hablamos de agua salobre el factor de conversión oscila entre el 70 y el 85%, mientras que cuando hablamos de agua de mar dicho factor de conversión oscila entre el 40 y el 45% cuando la configuración es de una etapa. Cuando existen en las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa una segunda etapa, el factor de conversión puede llegar al 55%.

### 2.3.4 Factor de rechazo

Es el cociente o la relación entre el caudal de rechazo y el caudal de alimentación. Por tanto responde a la siguiente relación:

$$F_r(\%) = (Q_r/Q_a) \times 100 = 1 - F_c$$

### 2.3.5 Caudal de agua producto

Dicho caudal de agua producto tiene la expresión

$$Q_p = L_p \times A \times (\Delta P - \Delta \Pi)$$

Siendo  $L_p = K_p/r$  y donde:

$Q_p$  es el caudal del agua producto en l/h

$\Delta P$  es la diferencia de presión hidrostática a través de la membrana en atm.

$\Delta \Pi$  es la diferencia de presión osmótica en atm.

$L_p$  es la permeabilidad hidráulica del agua en l/m<sup>2</sup>hatm.

A es el área de la membrana instalada en m<sup>2</sup>.

r es el espesor de la membrana en m.

$K_p$  es el coeficiente asociado a la permeabilidad.

Dicha ecuación se puede expresar de forma resumida de la siguiente manera:

$$Q_p = K \Delta P^*$$

Donde K es una característica de cada tipo de membrana y  $\Delta P^*$  es la diferencia de presión neta a través de la membrana.

### 2.3.6 Paso de sales

El paso de sal SP es el cociente entre la concentración de sales en el permeado  $C_p$  con respecto al promedio de concentración de sales en la alimentación  $C_a$ .

$$SP = C_p/C_a$$

Dicho parámetro viene indicado como una característica principal dentro de las características técnicas que aporta el fabricante de la membrana. [24]

## 2.4 Descripción del proceso tecnológico de la Ósmosis Inversa

El proceso de la desalinización consiste en retirar las sales disueltas en el agua de mar, siendo el método más utilizado el de la ósmosis inversa (en adelante O.I.). La O.I. realiza la separación de sales haciendo pasar el líquido a través de membranas semipermeables.

Una solución, con una concentración determinada de sales, desarrolla en su interior una tensión conocida como presión osmótica. Si esa solución se pone en contacto con otra de

diferente concentración, a través de una membrana semipermeable, se produce un flujo desde la solución más diluida hacia la más concentrada; flujo que cesa cuando se igualan las concentraciones a ambos lados de la membrana.

Se trata de un proceso natural que se produce también en los seres vivos donde la alimentación de las células se realiza por ósmosis a través de la membrana celular.

Pero en el proceso de desalinización el agua debe desprenderse de las sales y, por tanto, el flujo debe realizarse desde la solución concentrada hacia la diluida. Como ese proceso no se puede realizar de forma directa o natural, es necesaria la aplicación de una energía o fuerza externa para provocar la separación. De ahí el nombre de ósmosis inversa como consecuencia de la reversibilidad que hay que provocar en el fenómeno del proceso natural. [25-29]

El esquema básico de un proceso de ósmosis inversa es el que presentamos en la figura 7, en el cual se pone de manifiesto, que el agua de alimentación pasa por un grupo de motobomba de alta o media presión, para que posteriormente pase a los módulos de ósmosis inversa. El agua osmotizada potable es lo que llamamos permeado e irá a un depósito para ser distribuida y el concentrado, agua no adecuada, que se llama rechazo o salmuera irá al mar.

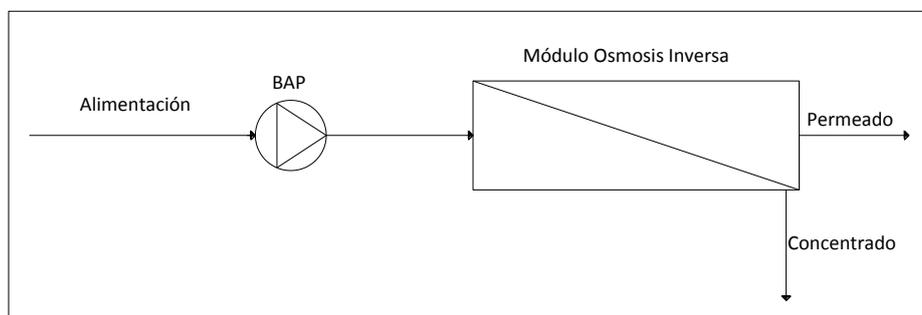


Figura 7. Esquema básico del proceso de ósmosis inversa.

Una instalación desalinizadora marina precisa captar el agua del mar para ser posteriormente sometida a un proceso industrial de O.I.. Dicha captación puede ser realizada mediante pozos perforados en la costa o bien mediante captación abierta en el mar a través de una conducción situada mar adentro lo suficiente para que la captación se realice a una cota de 20 metros de profundidad del fondo marino.

Dicha agua, previamente al proceso de ósmosis, debe ser tratada físicamente y químicamente. Para ello se le somete a una filtración, a través de filtros de arena, y a una microfiltración, a través de filtros de cartuchos. Durante este proceso, al agua se le añaden

ciertos reactivos químicos para su acondicionamiento, similares a los que en la actualidad son empleados en las estaciones depuradoras.

Una vez tratada, el agua se envía, mediante bombas de alta presión, hasta las membranas, donde se produce la separación de las sales, obteniendo, por un lado, un flujo de agua potable y, por otro, lo que se denomina “agua de rechazo o salmuera”, que no es más que agua con una concentración salina mayor que la del agua de mar.

En este tipo de instalaciones el factor de conversión está aproximadamente entre el 42 y 45%.

Hasta este momento, se ha explicado el proceso básico de la ósmosis inversa. La realidad es que el agua de rechazo o salmuera se queda con una gran cantidad de energía, por lo que con el paso del tiempo, se empezaron a introducir en las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa modificaciones para que esa energía se pueda recuperar para el sistema general. En base a esto, el esquema del proceso de la O.I. en las plantas desalinizadoras con sistemas de recuperación de energía es el que presentamos en la figura 8, en la cual se puede observar que el concentrado antes de pasar a ser rechazo e ir hacia el mar se introduce en el sistema recuperador de energía, y por tanto, una parte de la que pasa por el recuperador es enviada a través de una bomba booster de nuevo hacia el módulo de O.I. y otra parte es la que en este caso llamamos rechazo y se enviará al mar. Con estos sistemas de recuperación de energía que veremos detalladamente más adelante, el consumo energético del proceso total disminuye apreciablemente, lo que lleva consigo un menor consumo del mismo, que como también veremos posteriormente es uno de los costes más importantes a tener en cuenta en la T.D..

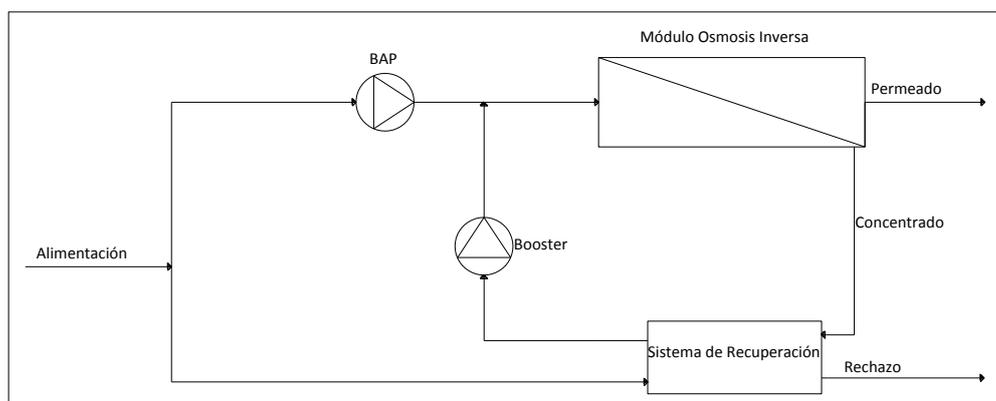


Figura 8. Esquema del proceso de ósmosis inversa con SRE.

Evidentemente, las 2 figuras anteriores nos muestran los esquemas basándonos fundamentalmente en el principio del proceso, que para el caso que nos ocupa es la ósmosis inversa.

El proceso general es más complejo y lo hemos dividido en 6 partes fundamentales que son las que ocurren desde que se capta el agua de mar hasta que se deposita el agua producto en un gran depósito y se vierte al mar el agua llamada salmuera o rechazo.

A continuación vamos a describir cada una de las partes del proceso tecnológico y para ello lo hacemos como hemos comentado anteriormente en base al esquema general de funcionamiento de una planta desalinizadora de O.I. que reflejamos a continuación.

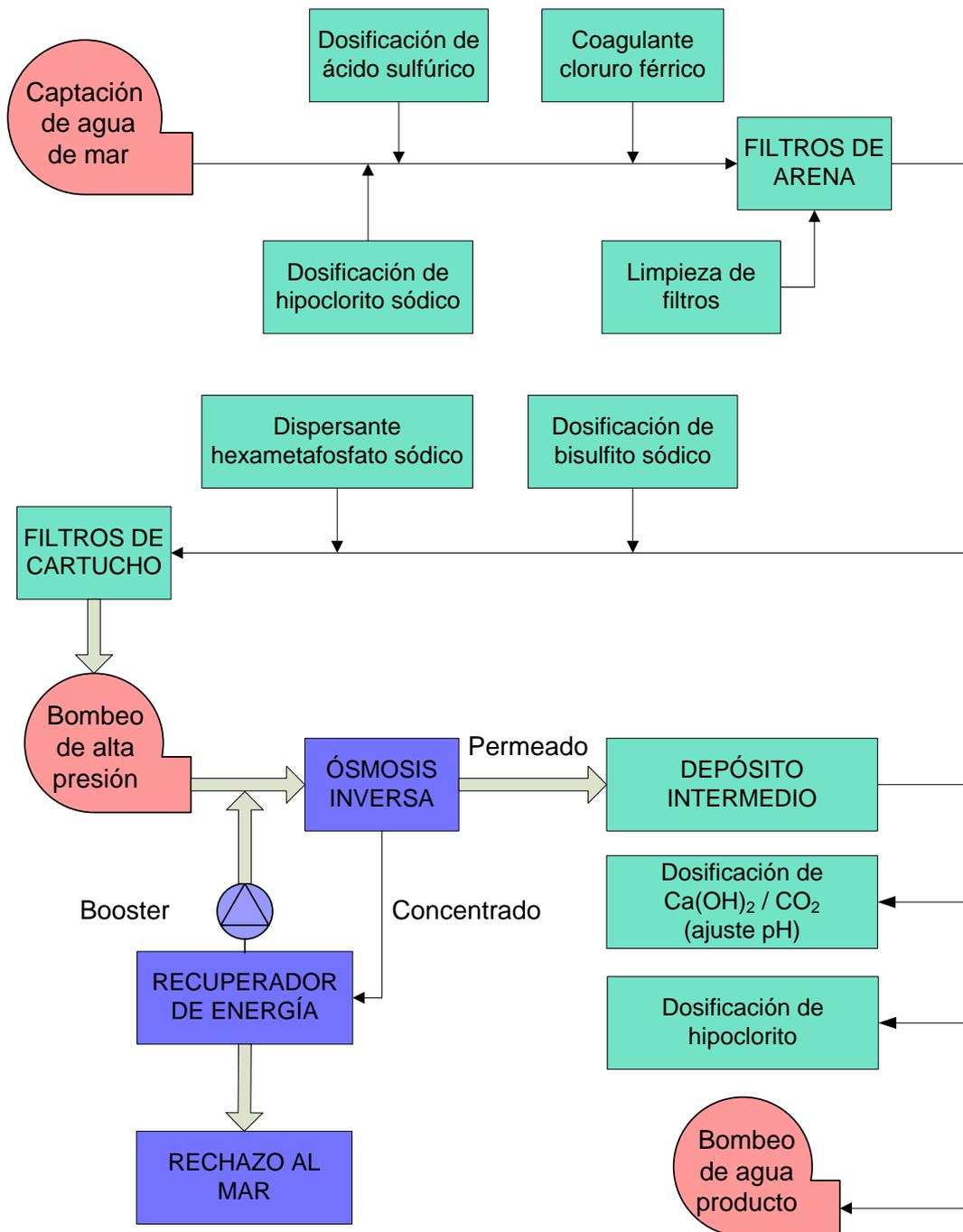


Figura 9. Esquema general del proceso de O.I..

Como se puede observar en la figura 9, existen unas determinadas fases o pasos fundamentales que son primordiales para la planta desalinizadora de agua de mar mediante O.I., que son independientes del tamaño de la planta y que son los siguientes:

Toma y bombeo de agua de mar  
Pretratamientos  
Grupo de motobomba de alta presión  
Bastidores de membranas. Líneas de producción  
Sistemas de recuperación de energía  
Postratamientos

#### **2.4.1 Toma y bombeo de agua de mar**

Lo primero que hay que estudiar a la hora de instalar una planta desalinizadora es como se va a disponer la toma de agua de mar. La manera más fácil y menos costosa es la de disponer de pozos playeros para poder lograr una filtración natural estudiada previamente. En caso contrario, es decir, no disponer de pozos playeros indicaría que la toma es abierta y que el sistema sería mucho más costoso.

Con respecto al bombeo de esa agua de mar, es importante que se pueda ahorrar bastante en él, si la planta se puede colocar a borde de mar, lo que implica que el bombeo es mucho más barato en maquinaria y en consumo de energía.

Cuando se dispone de una planta alejada del mar, tenemos que incurrir en una serie de gastos tales como maquinaria de bombeo más potente, infraestructura de tuberías, coste adicional de energía eléctrica de ese bombeo y lógicamente una caseta de obra civil para albergar dichas bombas de impulsión.

La misión de las bombas de toma de agua es suministrar el agua salada a desalinizar, bien por toma directa, es decir toma abierta, o de pozos subterráneos.

El pozo se llena por gravedad al nivel del acuífero marino. Una vez esto, se transporta el agua del pozo impulsado por bombas de alimentación al sistema de desalinización, es decir, a la planta desalinizadora.

Esta primera fase está compuesta principalmente por el colector de impulsión, ó bombeo, ó de captación del agua y por las electrobombas que impulsan dicha agua a través del colector anteriormente mencionado.

En la figura 10 podemos observar cómo es este colector de impulsión a su llegada a la planta desalinizadora de 18.000 m<sup>3</sup>/día, en Santa Barbara, en Netherland Antillas, observando en la misma los dosificadores de reactivos químicos y los tanques de color morado para almacenar dichos reactivos.



Figura 10. Tubería de captación de agua de mar. [30]

#### 2.4.2 Pretratamientos físico y químico: filtración y adición de reactivos

Una vez que se ha captado el agua de mar y ha llegado a la planta desalinizadora, empiezan los pretratamientos de la misma, tanto físicos que es a nivel de filtros como los químicos que es mediante la adición de reactivos.

En este apartado hay que hacer notar la importancia que tienen los tratamientos previos comentados para la mejora del agua y sobre todo para la vida de la maquinaria, bombas, motores, membranas, y el ahorro final que se produce en la desalinización de dicha agua. Dentro de estos tratamientos analizaremos los físicos y químicos.

El agua que se va a desalinizar como consecuencia de que tiene una serie de componentes orgánicos y no orgánicos tiene que estar controlada dentro de unos parámetros para que se pueda aplicar a los elementos que intervienen en la ósmosis inversa sin que se produzca un deterioro de los mismos.

Los tratamientos físicos van destinados a eliminar los elementos sólidos, algas y materias orgánicas, mientras que los tratamientos químicos tienen la misión de evitar ataques a las membranas o precipitados de sales sobre las mismas. [25]

El pretratamiento del agua de mar garantiza las condiciones óptimas del agua de alimentación a los módulos de O.I.. El objetivo es eliminar la existencia de actividad biológica y materias en suspensión y coloidales, así como un control del pH.

A la entrada del agua de alimentación a la planta llega el suplemento de reactivos químicos administrado por bombas dosificadoras. Así el agua está preparada para pasar los filtros correspondientes que retienen partículas según condiciones técnicas mayores a 4µm.

Cuando dispongamos de buenas tomas, a base de pozos playeros, con una simple filtración sobre arena y una segunda filtración a base de cartuchos hará que con pequeñas dosis de antiincrustante y determinados reactivos químicos el funcionamiento sea el correcto.

Evidentemente, en caso de no disponer de pozos playeros, los pretratamientos serán mucho más complejos, teniendo que añadir más reactivos químicos para ajustar el pH y por tanto serán mucho más costosos.

Los avances en este sentido van encaminados hacia la micro y la ultrafiltración, lo que implica la introducción en las bombas de alta presión y en las membranas de un agua de mejor calidad.

Pasamos a continuación a describir cada uno de estos tratamientos previos, basados en los filtros de arena, cartucho y los reactivos.

### **Tratamientos Físicos**

El agua tiene componentes físicos en suspensión que van desde arenas hasta partículas coloidales. Todos estos componentes deben eliminarse o controlarse dentro de unos parámetros antes de lleguen a los circuitos hidráulicos.

Para mejorar estos aspectos físicos que contiene el agua nos acogemos principalmente a los procesos de filtración que mediante éstos se separarán los sólidos que contiene y obtendremos un agua filtrada dentro de unos parámetros definidos previamente.

En el proceso de la filtración, el agua pasa por dos tipos distintos de filtros. En una primera filtración utilizamos **filtros de arena** (filtración hasta 8µm) donde se filtran las partículas más sólidas y de mayor consistencia.

Por lo general suelen disponerse en posición horizontal, tendiendo un movimiento del agua vertical, entrando por la parte superior y saliendo el agua filtrada por la parte inferior. En la figura 11 correspondiente a la planta desalinizadora de Alicante II, de 68.000 m<sup>3</sup>/día, podemos observar un tipo de filtro de arena.



Figura 11. Disposición de los filtros de arena. [31]

Una vez que se han eliminado las mismas, si los niveles de partículas siguen siendo excesivos debe recurrirse a una segunda fase de filtración que se denomina de afino y que está constituida principalmente por los **filtros de cartuchos** (filtración hasta  $5\mu\text{m}$ ). [32]

De todas maneras, este último tipo de filtración se realiza en todos los casos por motivos de seguridad y como exigencia comprendida dentro de las garantías que ofrecen los fabricantes de membranas. Por lo general los filtros de cartucho suelen disponerse en posición vertical, entrando el agua por la parte inferior y saliendo por la parte superior como se observa en la figura 12 que corresponde a la planta desalinizadora de Alicante II. [25]



Figura 12. Disposición de los filtros de cartucho. [31]

## Tratamientos Químicos

El agua que se va a desalinizar no se puede enviar a las membranas en la mayoría de los casos tal como viene desde su origen.

Las membranas tienen unas condiciones óptimas para su funcionamiento como puede ser la temperatura, el pH o la presión que es necesaria trasladar al agua para obtener el mayor rendimiento de la instalación.

Por otro lado la composición química del agua que vamos a desalinizar nos puede crear muchos problemas en las membranas y por lo tanto tenemos que evitarlo. Para evitar dichos problemas, según la figura 9 del esquema general del proceso de O.I., tratamos el agua con reactivos químicos de la siguiente manera: Antes de llegar el agua a los filtros de arena se trata con hipoclorito sódico para desinfectar, acto seguido se trata con un coagulante que suele ser cloruro férrico para formar los microfloculos y evitar un alto índice de colmatación y a continuación se trata con ácido sulfúrico para controlar el pH. Una vez pasado los filtros de arena y antes de llegar a los filtros de cartucho, el agua se trata con un dispersante que suele ser hexametáfosfato sódico y acto seguido se trata con bisulfito sódico para eliminar el cloro residual. [33]

En la figura 13 podemos observar como se almacenan dichos productos químicos en la planta desalinizadora de Alicante II.



Figura 13. Depósitos para dosificar los productos químicos. [31]

### 2.4.3 Grupo de motobomba de alta presión

Una vez tratada químicamente y filtrada adecuadamente, el agua pasa a las motobombas de alta presión que alimentan a los bastidores de membranas a la presión necesaria para hacerla pasar por las mismas.

El grupo de motobomba de alta presión está formado por la bomba centrífuga de alta presión, el motor de accionamiento eléctrico y el sistema de recuperación de energía que es el que ayuda a que el motor gire y se recupere la energía.

El concentrado o rechazo es el 55% del agua de alimentación (aunque depende de la tecnología de desalinización empleada), mientras que el 45% del agua de alimentación, que es el agua producto, que sale a presión atmosférica, debe asegurarse una contrapresión regulada en el flujo de rechazo. Este flujo de rechazo siempre contiene en torno al 55% de la energía invertida en las bombas de alta presión. Esa energía es recuperada mediante el sistema de recuperación y utilizada en el proceso de desalinización.

En los grupos de motobombas de alta presión, conjunto formado por bomba centrífuga, motor y turbina hidráulica que ayuda al giro del motor, inicialmente la turbina es la que se utilizó en el principio como sistema de recuperación de energía. Los cambios más notables en su momento fueron la sustitución de las turbinas Francis por las turbinas Pelton.

Este sistema de grupo de motobombas, en el cual a corto plazo no cabe esperar mejoras significativas, no se pasó del ahorro energético en más de 0,18 a 0,2 kWh/m<sup>3</sup>, siempre entendiendo en que las mejoras están indicadas en el rendimiento del grupo.

En las figuras 14 correspondiente a la planta desalinizadora de Melilla de 27.000 m<sup>3</sup>/día de producción y la figura 15 correspondiente a la planta desalinizadora de Murcia de 70.000 m<sup>3</sup>/día se pueden ver dos detalles de grupos diferentes de motobombas de alta presión, apreciándose en los dos detalles claramente lo que es cada parte, es decir, la bomba de alta presión, el motor de accionamiento y el sistema de recuperación de energía.

En ambos casos, el sistema de recuperación de energía está formado por una turbina Pelton de doble inyector.



Figura 14. Detalle 1 del grupo motobomba de alta presión (BAP). [34]



Figura 15. Detalle 2 del grupo motobomba de alta presión (BAP). [35]

#### 2.4.4 Bastidores de membranas. Líneas de producción

Una vez que el agua ha pasado por la bomba de alta presión llega a la parte más importante de la O.I.. Es en los bastidores de membranas semipermeables, lo que comúnmente se denomina líneas de producción y que es el verdadero corazón de la planta desalinizadora, donde se produce la separación de las sales disueltas.

El paso principal de la producción de agua es la separación del H<sub>2</sub>O de la mezcla de sales y minerales presente en el agua del mar. Este paso se realiza en la etapa de ósmosis inversa.

Para permitir una operación económica de la O.I. es necesario prevenir que se precipiten (cristalicen) las sales dentro de los módulos de O.I. o que las partículas de diatomeas y microalgas lleguen a las membranas. Para eso existen los dos tipos de filtración comentados en el apartado anterior, por arena y micro filtración usando cartuchos de fibra sintética. De acuerdo a la calidad de filtración se genera el ciclo de cambio de las membranas, estimado para nuestro trabajo de investigación en una reposición del 7% al año.

Los materiales de construcción de las membranas han sido múltiples y diversos. Para la realización de la T.D. se han utilizado membranas de poliamidas aromáticas que son las que más se utilizan en las Islas Canarias. Estas poliamidas aromáticas en un principio existían de fibra hueca y de arrollamiento en espiral, siendo éstas últimas por motivos de coste y de menor consumo las que se han impuesto en la ósmosis inversa. El camino a seguir en la evolución de las membranas es el de buscar membranas más baratas y de mejor calidad.

Para esto último, se ha demostrado que el avance va encaminado en los puntos siguientes:

- Resistencia al cloro y otros oxidantes.
- Mayor resistencia de ensuciamiento producido por coloides.
- Mayor productividad a menor presión de funcionamiento.
- Mayor selectividad en el rechazo de boro e iones monovalentes.
- Menor rechazo de iones divalentes.

Con todo lo comentado anteriormente, puede suponer a la larga un menor coste que puede rondar una bajada de 0,35 kWh/m<sup>3</sup>, en base a los datos aportado en las tablas 4 y 5. [36]

Las membranas se colocan en el interior de un tubo de presión y se conectan unas con otras para formar un conjunto estanco. En el tubo de presión se suelen colocar 6 o 7 membranas, aunque es importante comentar que a día de hoy se están empezando a colocar tubos con 8 membranas en su interior. Dichos tubos pueden estar colocados en serie o en paralelo para poder obtener la producción necesaria o requerida en cada momento.

A su vez, los tubos se colocan en una pequeña estructura que los soporta con la totalidad de conexiones y colectores de todo el conjunto.

La estructura anteriormente mencionada es lo que se denomina la unidad de producción comúnmente llamado tren de ósmosis inversa y es lo que nosotros denominamos línea básica de producción.

En las figuras 16 y 17 que pertenecen a la desalinizadora de O.I. del Canal de Alicante, llamada Alicante II, observamos en la primera las 7 líneas de producción que existen en la planta, todas idénticas y de igual producción y en la segunda tenemos un detalle frontal de una de éstas líneas de producción, observando los tubos de presión donde van alojadas las membranas semipermeables. También podemos ver en las figuras 16 y 17 los grupos de motobombas al completo así como la estructura que soporta los tubos donde van alojadas las membranas.



Figura 16. Detalle de 7 líneas de producción. [31]



Figura 17. Detalle de la línea de producción. [31]

### 2.4.5 Sistemas de recuperación de energía

Desde los años 80, las plantas desalinizadoras de O.I. contaban con determinados sistemas de recuperación de la energía. Si bien, fue a partir del año 1984 cuando llegó las generaciones de sistemas de recuperación de energía a base de turbinas y conversores hidráulicos. En función de lo comentado, establecemos una primera clasificación de los mismos, explicando lo más importante de cada uno de ellos en referencia a su esquema de funcionamiento básico y su esquema de montaje en la planta desalinizadora.

Según lo comentado presentamos la tabla 2.

| Sistema de recuperación de energía  | Nombre del dispositivo | Nombre del fabricante |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Turbinas                            | Francis, Kaplan        | Calder/Fedco          |
|                                     | Pelton                 |                       |
| Conversores hidráulicos centrífugos | Turbocharger           | PumpEngineering Fedco |
| Conversores hidráulicos dinámicos   | El recuperador         | Aqualing              |
|                                     | R.O. Kinetic           | Gestagua              |
|                                     | DWEER                  | Desalco/Calder        |
|                                     | ERI-PX                 | Energy Recovery Inc   |

Tabla 2. Clasificación de los sistemas de recuperación de energía.

Como se puede observar en la tabla que hemos presentado, los sistemas de recuperación de energía los clasificamos en tres grupos:

Turbinas

Conversores hidráulicos centrífugos

Conversores hidráulicos dinámicos

#### a) Turbina Pelton.

Dentro de los tres tipos de turbinas comunes que más se utilizan, como hemos mostrado anteriormente, la turbina Pelton, la turbina Francis y la turbina Kaplan, nos hemos basado en el estudio específico de la turbina Pelton, por ser la que mejor rendimiento posee, mejor funcionamiento y menor coste posee en relación a las demás.

## Esquema de funcionamiento básico

El sistema de funcionamiento es muy sencillo. Es importante hacer notar que cada una de las líneas de producción de cada desalinizadora va provista de una turbina Pelton. La turbina Pelton se carga con el caudal rechazado del proceso de ósmosis inversa, el cual tendrá la presión a la que fue sometida la bomba de alimentación aminorado por unas pequeñas pérdidas de resistencia. El caudal de concentrado se transforma en un chorro creado por medio de una tobera estacionaria convergente cónica, denominada inyector. Este inyector posee una espiga central capaz de moverse, con lo que se consigue poder variar la carga de la turbina. El inyector hace incidir la corriente tangencialmente al rotor, que produce el movimiento del eje.

El rotor está constituido por un disco que soporta unas palas con doble cavidad, colocadas periódicamente y dispuestas en su periferia, según la figura 18. Estas cavidades están diseñadas para que el chorro se desvíe hacia ambos lados del disco con las mínimas pérdidas posibles. Estas especies de cucharas están rebajadas en su extremo más externo al objeto de evitar interferir con la cuchara que recibe el chorro plenamente.

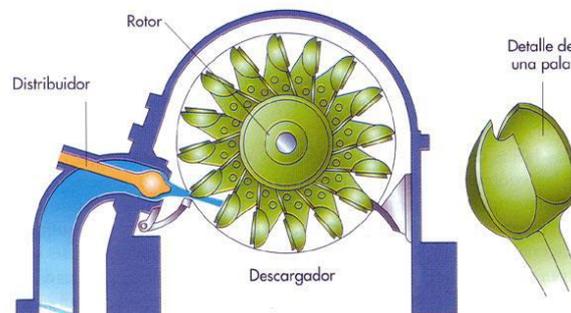


Figura 18. Esquema básico de una turbina Pelton. [37]

## Esquema de montaje en la planta desalinizadora

La turbina Pelton se acopla a una prolongación del motor, que a su vez está unido a una bomba.

Con esta disposición el motor eléctrico de accionamiento sólo tiene que aportar la energía que reclama la bomba menos la que recupera la turbina.

A continuación en la figura 19, mostraremos el esquema de montaje en la planta con la incorporación de la turbina Pelton.

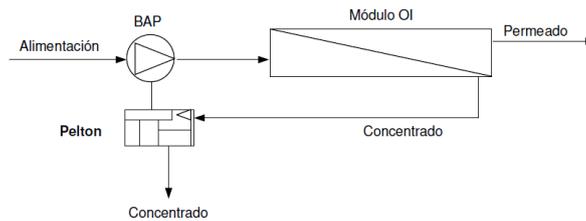


Figura 19. Esquema en la planta desalinizadora de la turbina Pelton.

## b) Conversores hidráulicos centrífugos

Como consecuencia de que no existen diferencias significativas entre las características principales de la mayoría de los fabricantes de los conversores hidráulicos centrífugos, estudiamos dicho convertor de manera generalizada.

### Esquema de funcionamiento básico

El convertor hidráulico centrífugo consta de dos zonas diferenciadas: el lado de la bomba y el lado de la turbina y ambas zonas poseen un eje común. El rotor de la turbina extrae la energía hidráulica de la corriente rechazada en la ósmosis inversa y la convierte en energía mecánica. El rotor que funciona como bomba, convierte la energía producida por la turbina en presión y el flujo de alimentación por tanto es llevado al módulo de ósmosis inversa. Figura 20.

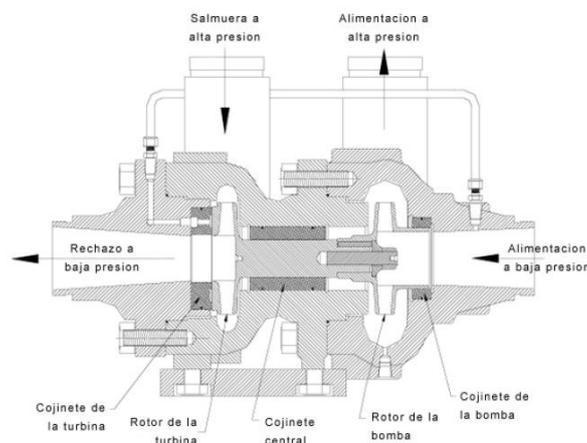


Figura 20. Esquema básico de un convertor hidráulico centrífugo. [38]

## Esquema de montaje en la planta desalinizadora

El convertor hidráulico centrífugo acorde a la figura 21, se instala entre el módulo de desalación y la bomba de alimentación de la planta. Así la bomba impulsa el flujo con la solución que se desea tratar a la entrada del lado de bomba del convertor hidráulico centrífugo, que eleva aún más la presión y la envía al módulo de ósmosis inversa. Una vez allí, la fracción rechazada se conduce a la entrada del lado de la turbina del convertor hidráulico centrífugo, donde intercambia la presión con la alimentación. [39]

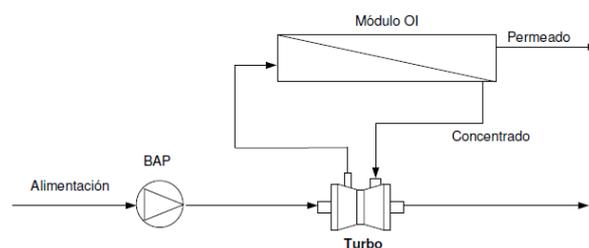


Figura 21. Esquema en la planta desalinizadora de un convertor hidráulico centrífugo.

### c) Convertor hidráulico dinámico. Aqualyng™

El sistema de recuperación de energía Aqualyng™ es un intercambiador de trabajo que utiliza la contracorriente de la sal del agua de mar desde las membranas para presurizar el agua de mar pre-tratada en varios procesos.

#### Esquema de funcionamiento básico

Este sistema en su totalidad utiliza un par de torres verticales como indica la figura 22 y un conjunto de válvulas que trabajan alternadamente en unas secuencias de descargas de compresión y descompresión. El agua de mar pre-tratada viene de un tanque alimentador presurizado que mantiene un flujo y una presión constante en el sistema. Una de las torres está bajo alta presión por la salmuera y desplaza el agua de mar, mientras la otra se llena con agua pre-tratada a baja presión desde la cima y desagua el rechazo hacia el fondo.

El agua de mar presurizada va hacia la membrana mediante una bomba booster. Esta bomba compensa las pérdidas de carga en las membranas y en el sistema de tuberías, que es alrededor de 2-3 bar. Toda la secuencia de esta operación es a través de un conjunto de

válvulas de acero inoxidable accionadas por un sistema hidráulico y controlado automáticamente por una plataforma de PLC, obteniendo así como resultado un flujo continuo de agua de mar en alta presión hacia las membranas.

En un sistema de desalinización de agua de mar por osmosis inversa (RO) convencional, con turbina Pelton como dispositivo de recuperación de energía, el consumo de energía aproximado es alrededor de 3-4,5 kWh/m<sup>3</sup> de agua potable producida desde el agua de mar. El consumo de energía al desalinizar el agua de mar a temperatura de 20°C con el sistema Aqualyng TM es de 2,0 kWh/m<sup>3</sup> de agua potable producida.

El sistema Aqualyng TM comparado a un sistema convencional con turbinas, experimenta un ahorro de 1,5 kWh/m<sup>3</sup>.

El sistema de Aqualyng TM utiliza la energía de la salmuera en un equipo especial, llamado Recuperador, el cual presuriza el agua de mar a la misma presión que la salmuera. La capacidad de la bomba, en términos de flujo de presión, es la misma que la corriente de la salmuera. El recuperador no cuenta con piezas móviles, en comparación con otros dispositivos de recuperación de presión, debido a esta característica la vida útil del sistema aumenta. Se requiere una pequeña bomba (booster) para compensar la presión del agua en las membranas y el sistema de tuberías. Esta bomba aumenta la presión del agua salada pre-tratada que atraviesa al “recuperador de presión” hasta la presión de operación requerida en los pequeños compartimentos de la membrana.

Esto significa que para un factor de conversión del 40%, el 60% del agua de alimentación a las membranas proviene del recuperador y solamente un 40% viene desde la bomba de alta presión. En un sistema convencional de desalinización de agua de mar por O.I., toda el agua de alimentación pasa por la bomba de alta presión que sólo tiene una eficiencia modesta, 70-85% dependiendo el tipo y el tamaño. El Recuperador tiene una eficiencia de alrededor del 98% y esto es donde marca la gran diferencia. [40]



Figura 22. Esquema básico del sistema Aqualyng. [40]

### Esquema de montaje en la planta desalinizadora

Como se puede observar en el esquema de montaje de la figura 23, el sistema Aqualyng se instala en paralelo con la bomba de alta presión que es la que alimenta a la planta y en serie con una bomba Booster. Dicho sistema consiste en dos torres como se ha observado anteriormente. Una de las torres está bajo alta presión debido a la salmuera y es la que desplaza el agua de mar, mientras que la otra se llena con agua pre-tratada a baja presión desde la cima y es la que desagua el rechazo hacia el fondo.

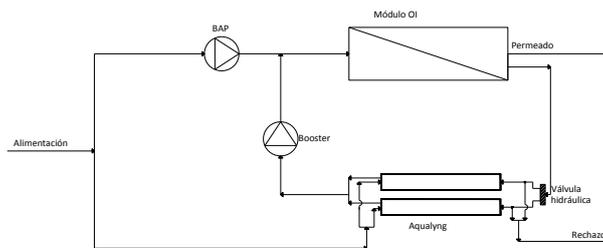


Figura 23. Esquema en la planta desalinizadora del sistema Aqualyng.

### d) Conversor hidráulico dinámico. R.O. Kinetic

Este conversor hidráulico dinámico es un intercambiador de presión que trabaja en una cámara no rotatoria con pistón y un juego de válvulas. Sus cámaras tienen forma de bucle y con ello se evitan las paradas del flujo de agua y las entradas a contracorriente.

### Esquema de funcionamiento básico

El intercambiador de presión R.O. Kinetic consta de dos cámaras isobáricas en forma de anillo cerrado, por las que circula la corriente de salmuera y la de agua de alimentación. Por cada una de ellas circula alternativamente ambas corrientes y funcionan las dos bajo ciclos alternos, de tal modo que mientras en una cámara se produce la carga de uno de los caudales y la descarga del otro, en la otra cámara se produce la descarga del primero y la carga del segundo. La corriente de rechazo transmite la energía de la presión al empujar la corriente de alimentación en ciclos de 12 segundos de duración. La geometría de las cámaras, según la figura 24, permite el desplazamiento, tanto del caudal de alimentación como el de concentrado, en su interior en el mismo sentido. Así se evita la pérdida de energía producida por la entrada a contracorriente de estos caudales. [41]

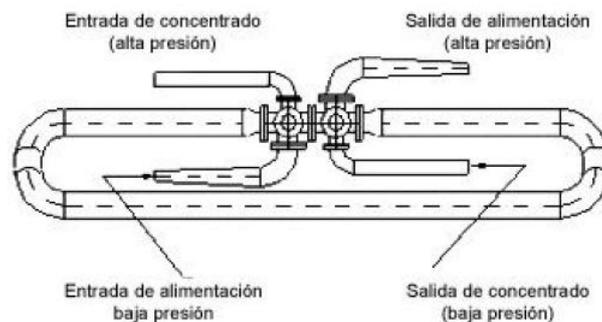


Figura 24. Esquema básico del sistema R.O. Kinetic. [41]

### Esquema de montaje en la planta desalinizadora

El R.O. Kinetic se instala, como el resto de intercambiadores de presión, en paralelo con la bomba de alimentación a la planta y en serie con una bomba Booster, según la figura 25. Una parte del caudal de alimentación es bombeado por el intercambiador de presión Kinetic. La presión debida a la pérdida de carga a través del módulo de ósmosis inversa, del circuito hasta el intercambiador de presión, la eficiencia del Kinetic en el intercambio y la pérdida de carga desde este dispositivo hasta la bomba booster, es aportada por la misma. La descarga de dicha bomba a presión idéntica a la de la descarga de la bomba principal de alimentación se une a esta última para alimentar al módulo de ósmosis inversa.

La bomba de alimentación trabaja con una fracción del caudal de alimentación, que es algo igual al caudal de permeado, puesto que el R.O. Kinetic, intercambia la presión de todo el caudal de rechazo, con un caudal igual de agua de alimentación.

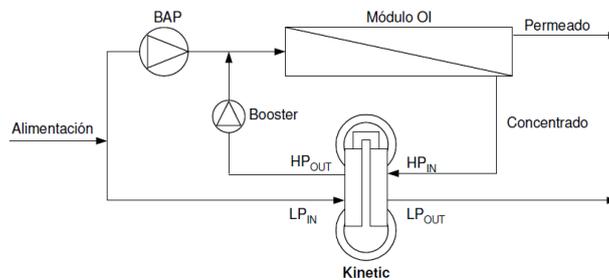


Figura 25. Esquema en la planta desalinizadora del sistema R.O. Kinetic.

#### e) Conversor hidráulico dinámico. Intercambiador de presión. CALDER. DWEER

A mediados de la primera década del 2000, después de haber sido ensayada en numerosas plantas de pequeño y mediano tamaño, esta generación de equipos comenzó a introducirse en las grandes industrias de desalinización. Para examinar el potencial teórico de reducción de consumo que ofrecían los equipos se aplicaron procedimientos de cálculos de rendimientos globales similar al aplicado anteriormente a las instalaciones con turbinas Pelton.

Cuando se utilizaban las cámaras isobáricas, además de la energía necesaria para alimentar las bombas de alta presión había que aportar una energía complementaria al circuito de recuperación para alimentar una bomba booster que regenera la presión del agua de mar presurizada en las cámaras isobáricas hasta equipararla a la presión de trabajo, antes de entregarla a las membranas.

Las cámaras isobáricas llegan a aprovechar hasta el 95% de la energía que permanece en las salmueras, pero pierden un 1% para facilitar la evacuación de las salmueras ya despresurizadas. La bomba booster sólo aprovecha un 80% de la energía adicional entregada al sistema.

Utilizando cámaras isobáricas el rendimiento global de una instalación industrial ideal puede alcanzar el 78,4%, esto es, sobre un 7% superior al de las turbinas Pelton, que se situaban en el 71,9%. [42]

Otro convertidor hidráulico dinámico, de interés es el Duplex Work Exchange Energy Recovery (DWEER) de la casa Calder. Dicho intercambiador de presión trabaja en una cámara no rotatoria con pistón y un juego de válvulas.

### **Esquema de funcionamiento básico**

El DWEER consta de dos cámaras isobáricas donde se produce el intercambio de presión entre fluidos. Cada una de ellas es semejante a la otra y cumple idéntica función, salvo que trabaja con un cierto desfase temporal respecto de la otra.

Las cámaras isobáricas poseen, cada una de ellas, dos entradas y dos salidas a alta y baja presión, tal como el PX, a excepción de que cada una de ellas es controlada por una válvula, por lo que dichas cámaras son estáticas. La corriente de agua de alimentación se introduce en el DWEER a baja presión inundándolo. Para ello la válvula de la entrada de baja presión queda abierta, mientras que la de salida de alta presión cerrada. Una vez queda lleno el DWEER con el agua de alimentación, se cierra también la válvula de entrada a baja presión y queda sólo abierta la de entrada a alta presión y la salida a alta presión, de tal suerte que el agua de rechazo entrante, empuja el agua de alimentación que ocupa el DWEER, obligándola a escapar del mismo a presión similar a la de entrada del rechazo, puesto que el agua es un fluido casi incompresible. Existe dentro de estas cámaras isobáricas una barrera física, figura 26, que dificulta el contacto entre el agua de alimentación y el concentrado. La existencia de este pistón disminuye el incremento de salinidad que sufre el agua de alimentación.

Tras la expulsión del agua de alimentación, queda completamente lleno el intercambiador de presión con el agua de rechazo de la ósmosis inversa, momento en el que se cierran las válvulas de salida y entrada a alta presión y se abren las de entrada y salida a baja presión. El agua de alimentación ocupa ahora el interior del DWEER, expulsando el concentrado a baja presión. Así comienza nuevamente el ciclo de funcionamiento en la cámara isobárica del convertidor hidráulico.

Ambas cámaras isobáricas funcionan con un desfase temporal adecuado, para que, puesto que los flujos de agua son continuos, no se provoque una interrupción del paso de los mismos. Así, mientras la válvula de entrada a alta presión se mantiene cerrada, puesto que se produce en dicha cámara la carga de agua de alimentación y expulsión del concentrado -fase de baja presión- en la otra cámara queda abierta la válvula de entrada a alta presión y el caudal de concentrado no se interrumpe, sino que intercambia su presión con el agua de alimentación que

ayuda a descargar en la fase de alta presión. De la misma forma, cuando la primera cámara isobárica pasa a la fase de alta presión, y el agua de alimentación no tiene acceso a dicha cámara, sí lo tiene en la otra, que ahora se encontrará en la fase de baja presión.

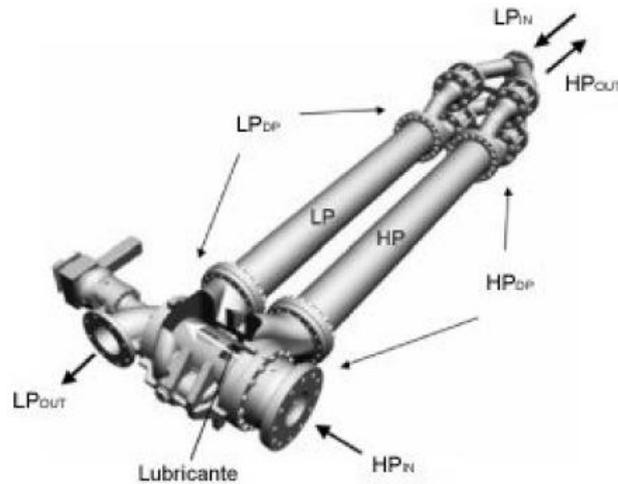


Figura 26. Esquema básico del sistema DWEER. [43]

### Esquema de montaje en la planta desalinizadora

El DWEER se instala en paralelo con la bomba de alimentación a la planta y en serie con una bomba Booster, según figura 27. De igual forma al PX, una parte del caudal de alimentación es bombeado por el intercambiador de presión DWEER, que no consigue elevar la presión hasta la de alimentación, por lo que la bomba Booster, que se instala a continuación es la encargada de entregar la pequeña diferencia de presión restante. La presión que repone la bomba Booster es la caída de presión que sufre el rechazo tras su paso a través del módulo de O.I. y conductos hasta el convertor hidráulico DWEER, más la presión que es incapaz este dispositivo de intercambiar con el agua de alimentación al no poseer un rendimiento del 100%. Ésta es la diferencia de presión entre la entrada y salida de alta presión.

La bomba de alimentación sólo trabaja con una fracción del caudal de alimentación, que es algo mayor que el caudal de permeado.

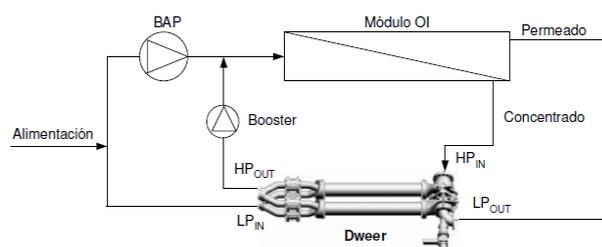


Figura 27. Esquema en la planta desalinizadora del sistema DWEER. [43]

## **f) Conversor hidráulico dinámico. Intercambiador de presión. ERI-PX**

El ERI procede del inglés de las palabras Energy Recovery Inc, que traduciéndolo al español, implica Sistemas de Recuperación de Energía. Este sistema novedoso que empieza a tener su auge a partir de 2008, presenta un consumo específico de energía en torno al 1,9 kWh/m<sup>3</sup>. Hoy por hoy, en el comienzo de la segunda década del 2000, junto al sistema de Aqualyng TM, son los dos tratamientos que menos energía consumen actualmente y los más efectivos.

El dispositivo ERI es una tecnología innovadora que puede reducir la cantidad de energía consumida en un proceso de desalinización de agua de mar mediante O.I. hasta en un 60%. Dicho dispositivo presenta una sola parte móvil, que es el corazón del mismo y que es un rotor de óxido de aluminio que flota sobre un cojinete hidrodinámico casi sin rozamiento. Dicho material cerámico que se ve afectado por los productos químicos no se corroe como consecuencia de que es hasta tres veces más duro que el acero. Para la recuperación de la energía utiliza el principio de desplazamiento, de manera que la energía que se necesita en la alta presión como consecuencia de la salmuera es compensada en la parte de la baja presión. El rotor se activa por el impulso del agua que a determinadas velocidades hace que se ajusten las variaciones de flujo y por tanto pueda ofrecer un amplio rango de operación.

Los componentes de cerámica requieren determinados procesos optimizados. El proceso de sinterización se produce a temperaturas superiores a los 1.600° C lo que hace que el material alcance una dureza de 9,00 Mohs. Una vez que la cerámica se ha enfriado lentamente y de manera uniforme, está preparada para evitar agrietamientos. Este proceso es fundamental para lograr una superficie dura y lisa, lo que hará que dicho material aguante muchos años en continuo funcionamiento en el entorno del agua de mar dura. [44]

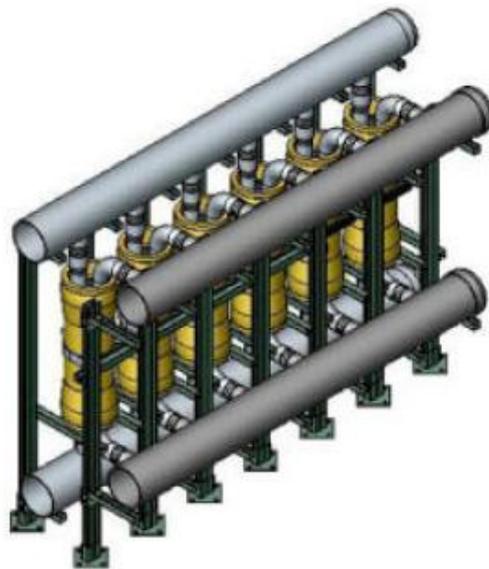


Figura 28. Esquema básico de adaptación en planta del sistema ERI-PX. [45]

### Esquema de funcionamiento básico

El PX es un dispositivo que, al igual que el resto de los intercambiadores de presión y del convertidor hidráulico centrífugo, consta de dos entradas y dos salidas, según figura 28. Una entrada es a baja presión: la entrada de alimentación; y la otra es a alta presión: la entrada del rechazo de la ósmosis inversa. De las salidas del PX, una es a baja presión: la salida del caudal de concentrado, que ya ha intercambiado su presión con la alimentación; y la otra salida, a alta presión, es la del caudal de alimentación a la planta de O.I. que ha recibido la presión del rechazo.

El PX es un sistema de geometría cilíndrica que alberga en su interior otro cilindro macizo con perforaciones longitudinales para la circulación del agua de un extremo a otro. Éste cilindro macizo o rotor cerámico, rueda dentro de la camisa exterior que posee las entradas y salidas del flujo.

La entrada y la salida de la alimentación (entrada de baja presión y salida de alta presión) se encuentran al mismo lado de la camisa exterior cerámica, según figura 29. Por su parte, la entrada y salida del rechazo (entrada de alta presión y salida de baja presión) se encuentran en el mismo lado y opuesto al anterior. Además las entradas situadas a ambos lados del dispositivo, se encuentran opuestas, en dirección diagonal al sistema de recuperación de energía. De esta forma las perforaciones longitudinales del rotor cerámico comunican la entrada de alimentación con la salida de rechazo y la salida de alimentación con la entrada de rechazo.

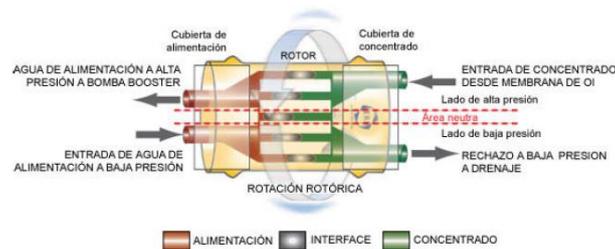


Figura 29. Esquema básico interno del sistema ERI-PX. [46]

Al penetrar el fluido entrante en el rotor, hace que este gire. Cuando el agua de alimentación se introduce por los canales de rotor, que comunican con la salida del rechazo, éste gira de tal forma que sus perforaciones comunican con la salida de la alimentación y la entrada de rechazo en el momento en que la alimentación ha atravesado el canal. Entonces la presión en el canal es la de la entrada de la alimentación. Puesto que ahora el canal se ha presentado a la entrada del rechazo, con una presión muy superior, la alimentación no es capaz de abandonar el rotor, sino que el rechazo se introduce en él, empujándola a salir por el extremo opuesto (salida de alta presión). Cuando entra el rechazo en el canal del rotor que contiene el agua de alimentación se produce un contacto íntimo entre ellas, aunque tan breve, que la difusión de sales entre soluciones es pequeña.

Mientras el rechazo empuja la alimentación que abandona el dispositivo por la salida de alta presión, sigue girando el rotor de modo que nuevamente queda orientado a la salida del rechazo y entrada de alimentación, al momento en que el rechazo llega al extremo. Aquí nuevamente comienza el ciclo, cuando el agua de alimentación se introduce en el rotor desplazando el rechazo que abandona el PX a baja presión por la salida.

### Esquema de montaje en la planta desalinizadora

El PX se instala en paralelo con la bomba de alimentación a la planta y en serie con una bomba Booster, según la figura 30. De esta forma, una parte del caudal de alimentación es bombeado por el intercambiador de presión PX, que no consigue elevar la presión hasta la de alimentación, por lo que la bomba Booster, que se instala a continuación es la encargada de entregar la pequeña diferencia de presión restante. La bomba de alimentación sólo trabaja con una fracción del caudal de alimentación, que es algo mayor que el caudal de permeado.

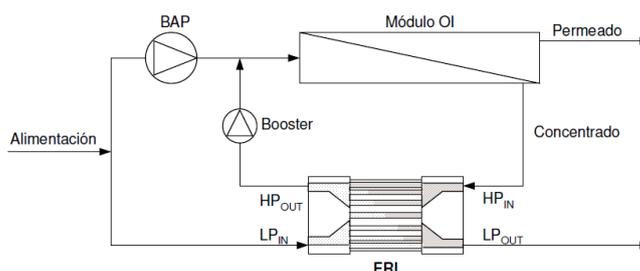


Figura 30. Esquema en la planta desalinizadora del sistema ERI-PX. [47]

Con la llegada de estos últimos equipos recuperadores de energía, se marcó un inicio hacia la disminución de los costes. El ahorro mediante estos sistemas de recuperación de energía marcó un antes y un después en las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante ósmosis inversa.

En la tabla siguiente recogemos una primera evolución, desde el año 1980 hasta el año 2004, del consumo de energía en la desalinización del agua de mar. Los valores de la misma, incluyen la totalidad de los conceptos: Captación del agua de mar, desalinización propiamente dicha, pérdidas y la impulsión del agua desalinizada hasta un depósito situado a 65.00 metros sobre el nivel del mar. [48]

| Año  | Consumo Total (kWh/m <sup>3</sup> ) | Sistema de recuperación de energía  | Técnica              |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| 1980 | 18,0                                | múltiples intercambiadores de calor | MSF                  |
| 1982 | 9,5                                 | Ninguno                             | Ósmosis Inversa (RO) |
| 1984 | 7,5                                 | Turbina contrapresión               |                      |
| 1986 | 7,2                                 |                                     |                      |
| 1990 | 6,2                                 |                                     |                      |
| 1993 | 5,5                                 |                                     |                      |
| 1996 | 5,3                                 | Turbina Pelton                      |                      |
| 1999 | 4,9                                 |                                     |                      |
| 2000 | 4,5                                 |                                     |                      |
| 2002 | 4,1                                 |                                     |                      |
| 2004 | 3,6                                 | Intercambiadores de presión         |                      |

Tabla 3. Evolución del consumo energético total. [48]

Como se puede observar en dicha tabla, hasta los años 80, no existía prácticamente método alguno que tuviese recuperación de energía. A comienzos del año 1980 observamos que

se inicia un sistema para recuperar energía en las plantas desalinizadoras de agua de mar a través de la incorporación de muchos intercambiadores de calor. El proceso en el cual se introducen éstos intercambiadores se llama MSF (Multi Stage Flash) y el consumo total de energía era del orden de los 18 kWh/m<sup>3</sup>.

En el año 1982 el mercado de la desalinización del agua de mar empieza a utilizar la ósmosis inversa, sobre todo en los países en los cuales no existía el petróleo, debido al menor consumo energético que presentaba frente al proceso de destilación. En estos momentos, se pasa de un consumo de 18 kWh/m<sup>3</sup> a consumir en torno a los 9,5 kWh/m<sup>3</sup>.

Van pasando los años y en 1984, en una planta de Lanzarote, de 500 m<sup>3</sup>/día, se instala una turbobomba compacta (bomba centrífuga de alta presión y turbina de contrapresión, ambas multietapas e integradas sobre una carcasa única) que permitió ahorrar, 2 kWh/m<sup>3</sup> lo que llevó al consumo total hasta los 7,5 kWh/m<sup>3</sup>.

Aplicando e instalando equipos de bombeo similares al anterior pero de grandes dimensiones, el uso de bombas y turbinas de cámara partida permiten avanzar los rendimientos de estas máquinas y poder llegar a un consumo energético de 6,2 kWh/m<sup>3</sup>.

En 1990 la ósmosis inversa se consagró en el mercado de la desalinización del agua de mar como consecuencia de un mayor ahorro en el consumo energético.

A partir de 1990 todas las grandes desalinizadoras de agua de mar que se fueron construyendo en España utilizaron la ósmosis inversa.

Las mejoras realizadas en las turbinas Pelton, como consecuencia de la aplicación de materiales adecuados para la alta corrosividad de la salmuera permitió que se llegase a obtener valores de consumo energético sobre los 4,1 kWh/m<sup>3</sup> en el año 2002.

Cuando parecía que la alta presión y las turbinas Pelton habían realizado su cometido, aparecen otros sistemas de recuperación de energía, los intercambiadores de presión. Dichos intercambiadores permitieron rebajar el consumo total de energía, situándolo alrededor de los 3,6 kWh/m<sup>3</sup> con la distribución indicada en la tabla adjunta. Referencia del año 2005. [48]

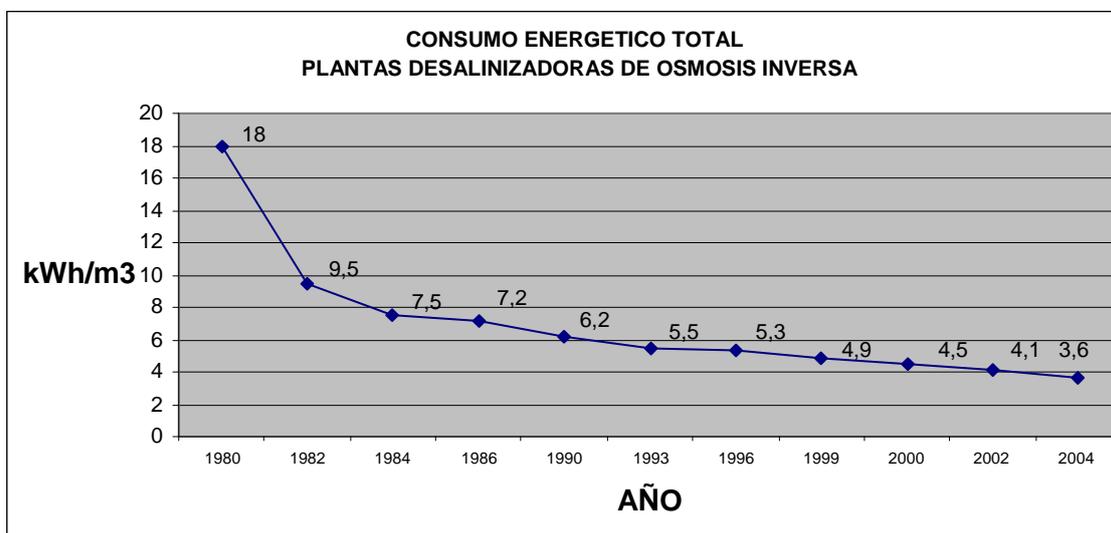
En dicha tabla se puede observar que el consumo específico del proceso de la desalinización mediante la O.I. es de 2,6 kWh/m<sup>3</sup>.

| Concepto                          | Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--|
| Captación y pretratamiento        | 0,6                                      |
| Desalinización (O.I.)             | 2,6                                      |
| Perdidas y varios                 | 0,1                                      |
| <b>Total a pie de desaladora</b>  | <b>3,3</b>                               |
|                                   |  |
| Bombeo al exterior                | 0,3                                      |
| <b>Total en la cota + 65.00 m</b> | <b>3,6</b>                               |

Tabla 4. Factores que intervienen en el consumo energético I. [48].

Evidentemente, los valores anteriores que han sido recogidos del artículo anteriormente mencionado son valores medios, utilizando intercambiadores de presión como sistema de recuperación de energía para obtener dichos datos y teniendo como es normal un valor de oscilación en torno al  $\bar{5}\%$ .

Mostramos a continuación la gráfica 10, para que se observe mejor la evolución tan significativa de los sistemas de recuperación de energía hasta el año 2004.



Gráfica 10. Evolución del consumo energético. Datos obtenidos de [48].

De toda la bibliografía revisada hemos observado que en el artículo de Manuel Fariñas Iglesias, titulado "Reducción del consumo específico de energía en las desalinizadoras de agua de mar de nueva generación", [49], muestra la tabla siguiente, que nos refleja con datos reales el

consumo de la planta desalinizadora de O.I. de agua de mar de las Carboneras, situada en Almería, con una producción de 120.000 m<sup>3</sup>/día. Dicha planta utiliza una turbina Pelton como sistema de recuperación de energía. De dicho cuadro podemos comentar que solamente el valor del proceso de la ósmosis inversa es el que ha aumentado en 0,5 kWh/m<sup>3</sup> como consecuencia de que utiliza una turbina Pelton como sistema de recuperación de energía, lo cual hace que el consumo total aumente hasta los 4,08 kWh/m<sup>3</sup>. Dicho artículo es realizado en el año 2006.

| Concepto                          | Consumo específico total (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--|
| Captación y pretratamiento        | 0,63   |
| Desalinización (O.I.)             | 3,10   |
| Perdidas y varios                 | 0,12   |
| <b>Total a pie de desaladora</b>  | <b>3,85</b>                                    |
|                                   |  |
| Bombeo al exterior                | 0,23   |
| <b>Total en la cota + 65.00 m</b> | <b>4,08</b>                                    |

Tabla 5. Factores que intervienen en el consumo energético II. [49].

Como se comentó anteriormente, a principios de la década de 1990, mientras las turbinas Pelton se imponían como el sistema estándar de recuperación de energía en la industria de la desalinización, comenzó a aparecer una nueva generación de equipos de recuperación inicialmente denominados “sistemas de desplazamientos positivo”, y hoy conocidos genéricamente como “cámaras isobáricas” o “intercambiadores de presión”. Dichos equipos de recuperación tuvieron su auténtico auge a partir del año 2004 tal como se ha comentado. Su consumo total era de 3,6 kWh/m<sup>3</sup>, siendo asignada a la parte de la O.I. un consumo de 2,6 kWh/m<sup>3</sup>.

Fue en la segunda mitad de la primera década del siglo XXI, es decir, a partir del 2004 y 2005 cuando se llegó a un consumo revolucionario de 2,5 kWh/m<sup>3</sup> en el proceso de la ósmosis inversa.

Solapándose con esos años, entre 2004 y 2006, la empresa Aqualyng con su sistema, empezaba a despuntar en los sistema de recuperación de energía, obteniendo valores sobre los 2,5 kWh/m<sup>3</sup>, evidentemente, dicha empresa llevaba trabajando en la recuperación de energía bastantes años, obteniendo en el año 2007 valores medios en torno a los 2,2 y 2,0 kWh/m<sup>3</sup> de consumo en el proceso de la O.I., para una serie de pequeñas desalinizadoras, que iban desde los 500 m<sup>3</sup>/día hasta los 10.000 m<sup>3</sup>/día.

Evidentemente, dichas desalinizadoras iban encaminadas para pequeños hoteles, campos de golf, urbanizaciones costeras y complejos de apartamentos o bungalows cercanos al mar. A la misma vez que Aqualyng y luchando entre ellos en el aspecto comercial y en el consumo energético se encuentran en el mercado los dispositivos R.O. Kinetic, DWEER y el ERI-PX con consumos aparentemente similares y en torno a los 2,0 kWh/m<sup>3</sup> para el proceso de la ósmosis inversa y en grandes plantas desalinizadoras, a partir de los 30.000 m<sup>3</sup>/día.

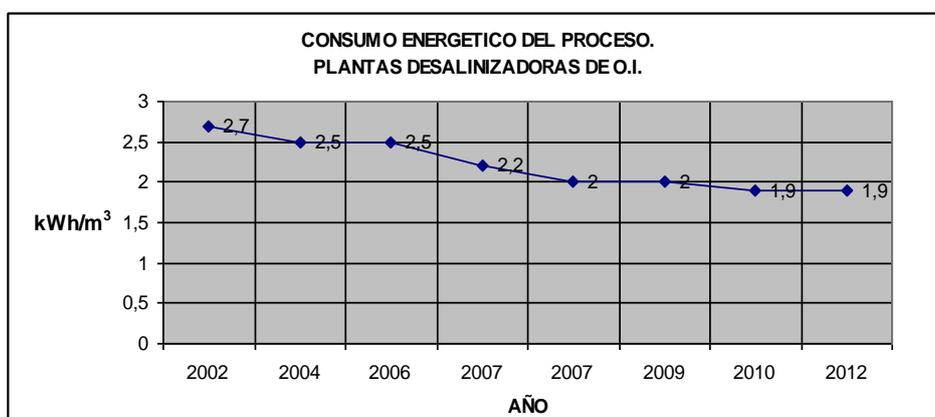
A día de hoy podemos comentar que el sistema de recuperación de energía que se está convirtiendo en universal y mejores resultados está dando es el ERI-PX, con consumos energéticos medios entre 2 y 1,9 kWh/m<sup>3</sup> para el tipo de plantas comentadas.

Presentamos la tabla 6, que responde a una segunda evolución de los sistemas de recuperación de energía, a partir de los intercambiadores de presión hasta nuestros días.

| Año  | Consumo del proceso (kWh/m <sup>3</sup> ) | Sis. de recuperación de energía | Técnica         |
|------|---|---------------------------------|-----------------|
| 2002 | 2,7                                       | Intercambiadores de presión     | Ósmosis Inversa |
| 2006 | 2,5                                       | O Cámaras isobáricas            |                 |
| 2004 | 2,5                                       | Aqualyng                        |                 |
| 2007 | 2,2-2,0                                   |                                 |                 |
| 2007 | 2,0                                       | R.O. Kinetic, DWEER y ERI-PX    |                 |
| 2009 | 2,0                                       |                                 |                 |
| 2010 | 2,0-1,9                                   |                                 |                 |
| 2012 | 2.0-1.9                                   | ERI-PX                          |                 |

Tabla 6. Evolución del consumo energético del proceso en la última década.

Con los datos obtenidos anteriormente realizamos la gráfica 11, de manera que se pueda observar de una forma más clara la evolución del consumo energético del proceso de la ósmosis inversa en la última década.



Gráfica 11. Evolución del consumo energético del proceso en la última década.

## 2.4.6 Postratamientos

Una vez que el agua ha sido desalinizada como consecuencia del paso a través de las membranas, presenta un pH ácido y una elevada agresividad. Para mejorar las características de esta agua lo mejor y mas barato es mezclarla con agua de otra procedencia. Si esto no es posible el postratamiento será a base de añadir hipoclorito sódico, hidróxido cálcico y  $\text{CO}_2$ .

El postratamiento del agua desalinizada tiene por objeto garantizar unas condiciones adecuadas de potabilidad y/o prevenir el crecimiento de microorganismos.

El agua osmotizada o el permeado de los módulos de ósmosis inversa debe ser acondicionada para cumplir con ciertas características de calidad, ya que el agua producida tiene un pH ácido y un bajo contenido de carbonatos, lo que la convierte en un producto altamente corrosivo. Esto exige su preparación antes de su distribución y consumo. El pH se ajusta con carbonato de calcio a un valor de 7,7. Adicionalmente, si se requiere, se agrega también fluoruro de sodio e hipoclorito según las regulaciones municipales para uso de agua potable.

En la siguiente figura 31, podemos observar depósitos exteriores con los reactivos del postratamiento necesarios para obtener un agua potable, correspondiente a la planta desalinizadora de Melilla de 27.000  $\text{m}^3/\text{día}$  de producción.



Figura 31. Depósitos de reactivos para el postratamiento. [34]

Por otro lado, el agua ya desalinizada como consecuencia del elevado rechazo de sales y los tratamientos químicos que se le han aplicado al agua antes de desalinizarla hace que antes de que sea apta para el consumo tenga unas características definidas. Tenemos que tener en cuenta el pH del agua que va a ser apta así como el desequilibrio iónico.

Cuando el agua que hemos desalinizado está apta para el consumo humano, es decir, se ha neutralizado, el pH está en condiciones, se le ha enriquecido en calcio y se ha controlado el cloro libre, es cuando se puede consumir, en cumplimiento del REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

En general, y a modo de resumen de este apartado 2.4, los requerimientos energéticos de la desalinización varían en función de la tecnología empleada, aunque hay una tendencia hacia la reducción, gracias a los avances tecnológicos.

Empleando sistemas de ósmosis inversa y contando que el líquido producto debe ser bombeado a los lugares de destino, el consumo energético está entre 3,5 y 4 kWh/m<sup>3</sup> según se pudo observar en las tablas 4 y 5. Se prevé que, con la mejora de la tecnología, según la tabla 6, el consumo energético del proceso ronda entre 2 y 1,9 kWh/m<sup>3</sup>, pueda obtenerse agua desalinizada con un consumo energético total en su destino de unos 2,9 kWh/m<sup>3</sup> para el año 2013.

Siempre que hablamos de una planta desalinizadora, hablamos de una instalación industrial que convierte el agua salada del mar en agua apta para el consumo humano y para uso industrial o agrícola.

Los avances tecnológicos no sólo se han centrado en el consumo energético, sino que se han ido estudiando minuciosamente cada elemento que forma parte de la planta desalinizadora, de manera que los avances son espectaculares hasta los días en los que nos encontramos.

Por último queremos recordar en este apartado que dicha agua ha de ser distribuida y bombeada a los clientes. Si la planta está cercana a su distribución nos ahorraremos tanto la infraestructura de tuberías como el bombeo y el consiguiente consumo eléctrico.

## 2.5 Análisis de Costes en Plantas Desalinizadoras de O.I.

Para finalizar este apartado de la O.I., pasamos a estudiar inicialmente los tipos de costes que tiene una instalación de este tipo. En este caso pasaremos a describir los mismos comentando todos los parámetros a tener en cuenta a modo de descripción general, sin entrar en cálculos debido a que el análisis de los costes en su totalidad es la base fundamental de nuestra T.D. y como hemos observado en el índice general existe un apartado dedicado en su totalidad a los costes, donde explicamos la metodología empleada, los costes analizados uno por uno con sus fórmulas, sus gráficas y los resultados obtenidos así como la adaptación de nuestros resultados a un modelo matemático.

Una vez comentado lo anterior entramos en la descripción básica de los costes.

En un primer estudio de las plantas desalinizadoras de O.I., se podría decir que cada instalación es única y que dichas plantas desalinizadoras se construyen a medida. La ósmosis inversa tiene una gran flexibilidad para adaptarse a cualquier tipo de circunstancias por lo que es posible realizar diferentes diseños para un mismo tipo de agua. Con el paso del tiempo se ha llegado a la estandarización de las mismas, de manera que se pueda reflejar a través de determinados parámetros los costes que a priori, según los cálculos realizados de la planta, y a posteriori, con la planta en funcionamiento, van a incurrir los propietarios de las plantas desalinizadoras.

Evidentemente, los parámetros que manejan los diseñadores son varios y deben siempre ir encaminados a la optimización de la instalación, no sólo desde el punto de vista de la primera inversión inicial sino que hay que diseñar también el coste en que va a incurrir dicha instalación a lo largo de su vida como consecuencia de su funcionamiento.

Antes de entrar a evaluar que tipos de costes afectan directamente al  $m^3$  de agua desalinizada, es importante hacer unas pequeñas reflexiones básicas que van encaminadas a la realización de las estructuras de las plantas y sus diseños y que pueden afectar directamente al coste final del agua. Dichas reflexiones son las siguientes:

- La determinación del factor de conversión final que según el diseño de la planta se podría obtener una vez que se encuentra ésta en funcionamiento. Evidentemente hay que determinar desde el principio cual va a ser el factor de conversión que se espera de nuestra planta puesto que dicha decisión afecta en el diseño de la misma. Cuanto mayor sea el factor de

conversión, hablamos de un margen entre el 42% y el 45% para las plantas desalinizadoras con una sola etapa y de conversiones del 55% en los casos que la planta desalinizadora cuente con dos etapas, más agua se producirá y por tanto el coste final disminuirá para la misma producción. Es importante hacer notar que si se decide diseñar la planta desalinizadora con dos etapas, inicialmente repercutirá en el coste, puesto que habrá un gasto añadido en inversión como consecuencia de dicho diseño.

- El diseño de las canalizaciones es importantísimo y fundamental, puesto que afecta directamente al coste de mantenimiento. Siempre que se pueda la totalidad de las canalizaciones, tanto eléctricas como de agua deben ser vistas y estar bien definidas, marcadas y distanciadas según marca la normativa vigente. Tenemos que tener en cuenta que cualquier persona que trabaje en la planta y se encargue del mantenimiento tiene que tener claro desde el primer día el funcionamiento de la misma.

- El número de membranas a instalar en dicha planta, en función del número de trenes o líneas de producción, número de tubos por tren y número de membranas por tubo. La cantidad de membranas deben de ser las adecuadas para que la producción sea la requerida. Un aumento de las mismas no implica una mayor producción para un mismo diseño y si un gasto innecesario y una disminución de membranas con respecto a lo diseñado puede repercutir en que la producción disminuya. Evidentemente asociado a las membranas existen costes directamente relacionados como son la reposición y el lavado de las mismas.

- La distancia y altura para bombear el agua al exterior, es decir, a los consumidores. Es muy importante, puesto que se necesita una bomba de impulsión y por tanto nos afecta directamente al consumo de energía. Evidentemente, hay que tener desde el principio muy definido la zona a la cual vamos a enviarle el agua producto para ser consumido.

- El tamaño de la planta interviene directamente en el coste y se consigue generalmente una economía de escala tanto en la inversión inicial como en la mano de obra de operación. En nuestra T.D. estamos presentando los costes para plantas desalinizadoras de pequeño tamaño, varían entre 500 y 15.000 m<sup>3</sup>/día. Se observará como afecta la economía de escala en estos momentos en función de la producción y el tamaño.

- La amortización de la inversión inicial es otro de los capítulos importantes, es decir, es el segundo coste en importancia. Debido a lo comentado anteriormente, podemos estar en el peor de los casos, en el cual la inversión es aportada directamente y en su totalidad a través de las entidades bancarias. En el mejor de los casos los empresarios podrían aportar la totalidad del capital de inversión inicial, lo que implica que el gasto de amortización sería nulo. En este caso como veremos a lo largo de la T.D. el coste de amortización es un factor fundamental.

- Los materiales a emplear deben ser de una calidad muy alta. Inicialmente no se debe escatimar en el gasto en este apartado. Es importante hacer notar que aunque inicialmente afecte a la inversión se observará con el tiempo que el coste en el mantenimiento se verá reducido y por tanto habrá que reemplazarlos mucho más tarde. No nos podemos olvidar que en la mayoría de los casos estamos trabajando en instalaciones que están en emplazamientos cercanos al mar y por tanto la corrosión y los factores climáticos y ambientales realizan un papel muy importante, por lo que podemos resumir que la selección de los materiales a emplear es un factor a tener muy en cuenta.

- Los rendimientos, las curvas de trabajo, la eficiencia y la vida útil de las bombas y motores reducen muchísimo los costes de energía en la planta. Es muy importante tener en cuenta las características técnicas de la maquinaria, puesto que como se verá en esta T.D., el consumo energético del proceso de la O.I. es el factor más importante en el estudio de costes de las plantas desalinizadoras de O.I..

- La planta desalinizadora debe estar funcionando continuamente, no menos de 350 días al año. Cuanto mayor sea el tiempo de funcionamiento, mayor serán las cantidades producidas y por tanto para las mismas condiciones una mayor producción implicará una disminución de los costes. Tenemos que tener en cuenta que las plantas desalinizadoras se diseñan para trabajar las 24 horas del día. Es importante que la planta se pare cuando no haya más remedio y que en caso de que sea así la paralización sea por etapas para que los días que no se encuentre operativa en su totalidad, no más de 10 días al año, por lo menos una parte de la misma siga produciendo agua potable.

Existen numerosísimos tipos o maneras de clasificar los costes en las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa según hemos podido leer en los artículos que se encuentran en el capítulo de la bibliografía, pero entiendo que a la hora de realizar nuestra T.D. debe existir una clasificación clara, bien definida y que pueda servir para obtener un cálculo real del coste de

una planta desalinizadora de O.I. En función del criterio anterior las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante ósmosis inversa las podemos estructurar en base a dos tipos de coste, atendiendo al gasto o coste para construir la planta y atendiendo al gasto o coste de funcionamiento de la planta. Según lo que hemos dicho, al estudiar los parámetros de coste en las plantas desalinizadoras de O.I. nos encontramos que éstos pueden ser inicialmente costes de inversión y costes de operación o explotación.

Para realizar esta descripción breve de los costes, nos hemos apoyado en la T.D. titulada “Estudio de la viabilidad técnico-económica de la desalación de agua de mar por ósmosis inversa en España”, documento [50], que como veremos en el estado del arte será parte de la frontera del conocimiento para esta T.D. y en varios proyectos finales de carrera, realizados en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, entre los meses finales del año 2008 y finales del año 2010. [51-53]

### **2.5.1 Costes de Inversión**

Son aquellos costes o gastos que son necesarios para poder construir la planta desalinizadora la cual va a estar en perfecto estado para su posterior funcionamiento.

#### **2.5.1.1 Coste de Inversión ó Capital Inicial**

Se entiende por inversión inicial a todos los gastos que se generan para poder poner en marcha la planta desalinizadora. Nosotros entendemos al hablar de gastos de inversión que dicho coste lleva consigo la instalación completa de la planta desalinizadora para iniciar la actividad de la desalinización, desde la compra de terrenos con la totalidad de proyectos, tasas y obra civil, pasando por la captación del agua de mar, la instalación completa del proceso de ósmosis inversa con todos sus equipos y finalizando en el depósito de almacenamiento. Inicialmente, en este apartado de descripción, se ha dejado fuera de este coste de inversión la evacuación de la salmuera y las situaciones en las cuales haya que elevarse el agua a alguna cota diferente de la cota a nivel del mar.

El dejar fuera de los costes de inversión la evacuación de la salmuera es debido a que entendemos que dicho coste es un coste medioambiental que nosotros lo estudiamos en un apartado independiente y como un coste diferente, como consecuencia de que la normativa vigente así lo obliga. Es decir, hasta este momento, la normativa no contemplaba como obligación la evacuación de la salmuera hasta puntos alejados en el mar, por lo que evacuarla o

no en condiciones dependía del grado de sensibilidad del promotor. Hoy en día es obligación según la normativa vigente. En el apartado de costes de explotación la estudiamos con detenimiento.

En segundo lugar hemos dejado fuera de los costes de inversión las situaciones en las cuales haya que elevar el agua a cotas diferentes a la cota del nivel del mar. Con esto queremos explicar que aquellas situaciones que por su diferencia de cota con respecto a la del nivel del mar sea elevada, habrá que introducir en los costes de inversión las bombas de impulsión del agua hasta la cota deseada y las respectivas canalizaciones. En los cálculos de costes definitivos si se ha tenido en cuenta el bombeo hasta una altura de 25 metros.

En el documento [50], se nos presenta la siguiente estructura de los costes, tabla 7, que según su autor viene marcada por las siguientes partidas con un porcentaje de aproximación con respecto a la inversión total inicial, tomando valores mínimos, máximos y valores medios:

| Partida                              | % de la inversión (min-max) | % valor medio |
|--------------------------------------|-----------------------------|---------------|
| Captación de agua de mar             | 2-5                         | 3             |
| Emisario para evacuar la salmuera    | 2-4                         | 3             |
| Equipos mecánicos y membranas        | 50-70                       | 60            |
| Equipos eléctricos e instrumentación | 10-15                       | 13            |
| Obra civil                           | 5-15                        | 10            |
| Equipo de recuperación de energía    | 1-3                         | 2             |
| Compra y servidumbre de terrenos     | 1-3                         | 2             |
| Embalses de regulación               | 1-3                         | 2             |
| Licencia, tasas y permisos           | 1-2                         | 2             |
| Proyecto, dirección y supervisión    | 2-4                         | 3             |

Tabla 7. Estructura de costes de inversión. [50]

También según la T.D. correspondiente al documento [50], se hace una estimación del coste de inversión para grandes plantas, comentando que no existe economía de escala y cifrando dicho coste de inversión en torno a los 600 €/m<sup>3</sup>/día de producción. Es importante hacer notar que el documento anterior corresponde al año 2002 y que la estimación es para grandes plantas desalinizadoras.

Continuando con la información disponible referente a este tipo de coste, según el documento [51], que hace referencia a la Isla de Gran Canaria, se hace notar, que para plantas desalinizadoras de ósmosis inversa, de tamaño mediano y grande, es decir, superiores a 10.000 m<sup>3</sup>/día, el coste de inversión se sitúa entorno a los 720 €/m<sup>3</sup>/día de producción. Con respecto a

este coste, hay que hacer notar que Miguel Torres Corral, en una de sus publicaciones [36], nos muestra determinados valores de costes de inversión, pasando de 610 €/m<sup>3</sup>/día de producción en el año 2002, con una aproximación que según él, se llegaría a 590 €/m<sup>3</sup>/día de producción en el año 2010. Estos valores de Miguel Torres están considerados siempre a un período de amortización de 15 años y un tipo de interés del 4%.

Nosotros en nuestra T.D. estudiaremos y calcularemos detallada y minuciosamente cada elemento que pertenece a este coste de inversión, aportando valores claros sin aproximación de dicho coste.

### 2.5.1.2 Coste de Amortización del Capital Inicial

Una vez que se ha estimado la inversión que se va a realizar, procedemos a estudiar el cálculo de las anualidades.

Es importante comentar que desde que exista una inversión inicial, los costes debido a la amortización del capital inicial bajan notoriamente. Para estudiar la amortización procederemos a calcular las anualidades bajo la idea de que el capital ha sido prestado en su totalidad y que la inversión durará el mismo tiempo que el préstamo. Eso quiere decir que se pagarán anualidades desde el primer mes de funcionamiento de la planta hasta el último mes de funcionamiento de la misma.

Para proceder al cálculo de la amortización anual lo haremos a través de la fórmula de la amortización financiera, que es la siguiente:

$$a = I \times [ i(1+i)^n / (1+i)^n - 1 ]$$

Donde:

a= anualidad

I= inversión

n= nº de años de vida de la inversión

i= tanto por uno de interés

A modo de ejemplo y para hacernos una idea de lo que estamos hablando, presentamos en la siguiente tabla 8 las anualidades de amortización para un capital de 6.000 €, variando el valor del interés entre el 3 y el 5% y teniendo la posibilidad de amortizarlo entre 1 y 20 años.

Queremos hacer hincapié en que el periodo de vida medio útil de la planta está sobre los 15 años que es el mismo que el periodo de inversión. El valor del interés dependerá de la entidad bancaria y del momento en el cual se solicite el préstamo.

| ANUALIDADES. AMORTIZACIÓN DE 6.000 € |             |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------|-------|-------|
| Años                                 | Interés (%) |       |       |       |       |
|                                      | 3           | 3,5   | 4     | 4,5   | 5     |
| 1                                    | 6.180       | 6.211 | 6.240 | 6.270 | 6.300 |
| 2                                    | 3.182       | 3.213 | 3.245 | 3.276 | 3.307 |
| 3                                    | 2.185       | 2.217 | 2.250 | 2.282 | 2.315 |
| 4                                    | 1.620       | 1.639 | 1.651 | 1.694 | 1.736 |
| 5                                    | 1.304       | 1.312 | 1.327 | 1.348 | 1.370 |
| 6                                    | 1.074       | 1.122 | 1.168 | 1.172 | 1.182 |
| 7                                    | 962         | 989   | 1.019 | 1.029 | 1.037 |
| 8                                    | 844         | 864   | 888   | 914   | 929   |
| 9                                    | 783         | 795   | 813   | 836   | 846   |
| 10                                   | 711         | 722   | 740   | 762   | 788   |
| 11                                   | 656         | 666   | 684   | 706   | 723   |
| 12                                   | 611         | 621   | 640   | 663   | 682   |
| 13                                   | 562         | 586   | 605   | 621   | 642   |
| 14                                   | 534         | 548   | 569   | 588   | 606   |
| 15                                   | 501         | 525   | 540   | 562   | 577   |
| 16                                   | 481         | 499   | 517   | 535   | 555   |
| 17                                   | 457         | 477   | 492   | 518   | 533   |
| 18                                   | 438         | 459   | 477   | 496   | 516   |
| 19                                   | 421         | 438   | 460   | 479   | 499   |
| 20                                   | 406         | 418   | 441   | 462   | 482   |

Tabla 8. Anualidades de amortización para inversión de 6.000 €.

Una vez que está claro y bien definido la inversión a realizar y el coste que vamos a tener mensualmente y durante toda la vida en la planta desalinizadora como consecuencia de la amortización de la misma pasamos a esbozar brevemente los costes en los cuales vamos a incurrir como consecuencia del funcionamiento de la misma.

### 2.5.2 Costes de Operación o Explotación

Son los costes o gastos en los cuales se va a incurrir debido al funcionamiento de la planta desalinizadora una vez que se encuentra en perfecto estado para su funcionamiento, es decir son los que se derivan cuando la planta comienza a operar o a explotarse y que varían en función de las circunstancias que concurran en cada instalación.

### 2.5.2.1 Coste de Consumo de Reactivos

El consumo de los reactivos y productos químicos debería ser directamente proporcional a la producción de agua, es decir, a mayor producción mayor consumo.

Evidentemente, el coste por metro cúbico debería ser independiente del tamaño de la planta.

En la realidad se puede conseguir disminuir el coste de los productos químicos como consecuencia del aumento de la cantidad de los productos consumidos. Es decir, lo que se denomina economía de escala.

Los reactivos químicos se utilizan para acondicionar el agua de alimentación. Éstos son el hipoclorito sódico, coagulantes, ácido sulfúrico, polielectrolitos, dispersantes y bisulfito sódico. Otros se utilizan para el acondicionamiento del permeado, como son el hidróxido cálcico, anhídrido carbónico e hipoclorito sódico y otros reactivos diversos se utilizan para la limpieza de las membranas.

Los productos y reactivos químicos que se utilizan en las plantas desalinizadoras de O.I. los vamos a explicar en función de que se utilicen antes o después del tratamiento, es lo que llamamos pretratamiento y postratamiento, y son los siguientes según [50-54]:

#### Reactivos químicos utilizados en el pretratamiento

##### a.1 Hipoclorito Sódico. (NaOCl)

Se suele utilizar para desinfectar el agua y para eliminar cualquier materia orgánica que pueda tener el agua de mar al entrar en la planta desalinizadora.

##### a.2 Acido Sulfúrico. (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Su utilización es para ayudar a regular el pH y controlar los niveles de carbonatos y bicarbonatos que pueda tener el agua de alimentación.

##### a.3 Polielectrolitos.

Su utilidad es la de ayudar en la floculación y producir flóculos de mayor tamaño.

##### a.4 Coagulantes. Cloruro Férrico. (FeCl<sub>3</sub>)

Según las características que presenta el agua de mar se puede necesitar el coagulante. El más utilizado es el cloruro férrico. La utilidad del coagulante va encaminada a formar microfloculos que serán retenidos en los filtros. También el coagulante reduce el valor del SDI.

#### a.5 Bisulfito Sódico. ( $\text{NaHSO}_3$ )

La utilidad del bisulfito sódico es la de ser agente reductor ante la presencia en el agua de mar de agentes oxidantes. También el bisulfito elimina el cloro residual y en algunos casos ayuda a reducir el pH.

#### a.6 Dispersantes. Hexametáfosfato Sódico. ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub>

Como dispersantes o inhibidores de incrustaciones suelen utilizarse muchos, aunque el más conocido es el hexametáfosfato sódico. Su utilización va dirigida para evitar y controlar la precipitación de determinadas sales.

### **Reactivos químicos utilizados en el postratamiento**

#### b.1 Hidróxido Cálcico. Cal. $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El hidróxido cálcico conjuntamente con el dióxido de carbono actúan en lo que se llama la remineralización del permeado o agua producto, es decir, añadir determinados minerales para que el agua que se va a consumir tenga las características adecuadas según la ley vigente. Concretamente, la cal se usa para calcificar el agua y controlar el pH de la misma.

#### b.2 Dióxido de Carbono. ( $\text{CO}_2$ )

El dióxido de carbono se encarga de la segunda parte de la remineralización, que es la carbonatación del agua.

#### b.3 Hipoclorito Sódico. ( $\text{NaOCl}$ )

Al igual que en los pretratamientos, el hipoclorito sódico se utiliza en los postratamientos para desinfectar el agua que va a ser almacenada en depósitos para su posterior reparto.

A continuación vamos a mostrar la figura 32, en la cual se puede observar el conjunto del equipo para dosificar el bisulfito sódico. Esto es, depósito, bomba y agitador.



Figura 32. Equipo dosificador de reactivo. Depósito, bomba y agitador. [52]

### 2.5.2.2 Coste de Reposición de Filtros de Cartuchos

Una vez que el agua ha sido tratada con los reactivos adecuados y ha sido filtrada con los filtros de arena es llevada a la filtración con cartuchos. La misión de estos filtros de cartuchos es la de servir de seguridad ante cualquier problema en el pretratamiento. Los filtros de cartuchos protegen a las bombas de alta presión. Según el documento [50], se realizan dos reposiciones de filtros de cartucho al año cuando la toma de agua es a base de pozo filtrante, caso que nos ocupa en nuestra T.D., con una aproximación del precio medio del cartucho cercano a los 9 € por unidad para grandes plantas desalinizadoras, a partir de 30.000 m<sup>3</sup>/día. Como veremos más adelante los precios de los cartuchos es una parte de las plantas desalinizadoras que no han bajado en coste y teniendo en cuenta que estamos estudiando plantas desalinizadoras de tamaño pequeño, observaremos que en las Islas Canarias barajamos precios que rondan los 12 € de coste medio por unidad de cartucho.

El tipo de cartucho y las dimensiones del mismo son variables, por lo que en el mercado puede existir una gran variación de filtros de cartucho. Nosotros a la hora de elegir el cartucho nos hemos basado en cartuchos filtrantes principales de 1.250 mm de longitud que son capaces de alojar en su interior 5 cartuchos elementales de 250 mm de longitud.

En la figura 33 podemos observar determinados tipos de cartucho y marcas. A su vez se puede observar el filtro grande vertical, donde en su interior van alojados los filtros de cartuchos principales.

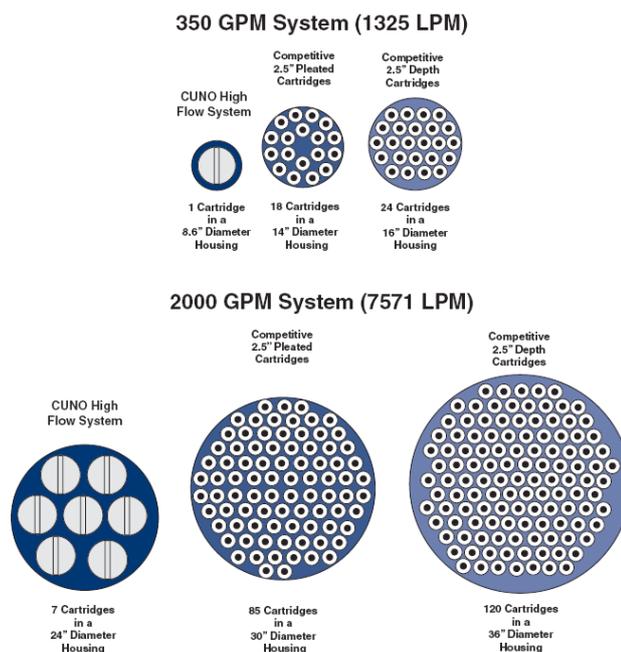


Figura 33. Filtros de cartuchos según diámetro y tecnología. [52]

### 2.5.2.3 Coste de Reposición de Membranas

Hace tiempo la vida media de las membranas no pasaba de los 5 años, lo que llevaba a tener en el pensamiento que el grado de reposición era del 20% anual.

Sobre la época de los años 2000 y 2002, los fabricantes garantizaban un grado de reposición que estaba sobre el 12% anual.

A partir de esos años las membranas han ido mejorando notablemente y según el documento [50], a partir del año 2002 se empezaba a notar que el grado de reposición anual real, basado en los operarios de las plantas desalinizadoras y no en los fabricantes, estaba entorno al 10%, con un coste por unidad que variaba entre 900 y 700 € la unidad.

En la actualidad se ha mejorado concienzudamente el precio y la calidad de las membranas por lo que el coste ha disminuido notablemente así como el porcentaje de reposición. Evidentemente, la influencia sobre el coste del metro cúbico de agua desalinizada ha sido muy importante.

Hoy por hoy el grado de reposición de membranas está cercano al 7% para desalinización de agua de mar con tomas realizadas a través de pozos playeros. Asimismo, el coste medio de la membrana ha bajado sustancialmente hasta valores sobre los 600 € la unidad.

Queremos añadir que dichos costes son en relación a membranas marca FILMTEC, tipo SW30HRLE-400, realizadas de poliamida aromática (TFC), con una configuración de

arrollamiento en espiral, con una superficie activa de 37 m<sup>2</sup> y un caudal nominal de producción de 28 m<sup>3</sup>/día.

En la figura 34 podemos observar como es una membrana tipo en su interior, con configuración en arrollamiento en espiral.

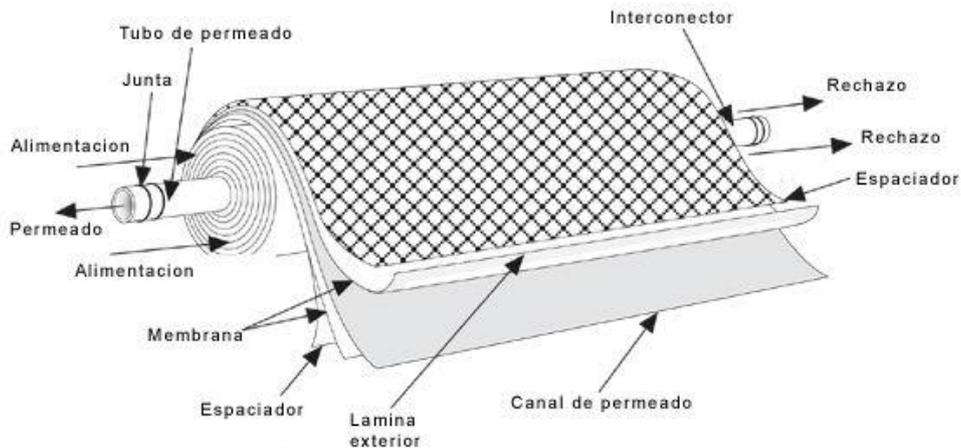


Figura 34. Membrana tipo con arrollamiento en espiral. [53]

Como se comentó en los apartados iniciales cuando se hablaba de las membranas, éstas van alojadas dentro de un tubo de presión, como se puede observar en la figura 35, que hasta hace poco años podría introducir la variable de 6 y 7 membranas dentro del mismo tubo.

En la presente T.D., y una vez que se ha hablado con los fabricantes de este tipo de membranas, introducimos la novedad de que trabajamos con tubos de presión que admiten 8 membranas en su interior, no realizado con anterioridad en las Islas Canarias. Evidentemente, observaremos en el apartado de costes como afecta a los costes de membrana pero también observaremos como mejora la producción total y como varían determinados costes que están relacionados con este factor.



Figura 35. Tubo de presión de la firma Filmtec. [52]

#### 2.5.2.4 Coste de Personal

El personal que es necesario en el mantenimiento de una planta desalinizadora de O.I. depende evidentemente del tamaño de la planta y del grado de automatización de la misma. La plantilla de personal en una planta de este tipo se puede dividir en tres categorías: personal de dirección (ingenieros de diferentes cargos), personal de operación (oficiales de primera y segunda) y personal de mantenimiento (oficiales de tercera y peones).

Como hemos dicho, el tamaño de la planta es muy importante en este aspecto, motivo por el cual vamos a realizar la siguiente clasificación en función de su producción.

a) Pequeñas instalaciones hasta 2.000 m<sup>3</sup>/día. Suelen ser instalaciones de complejos turísticos, hoteles y pequeñas urbanizaciones costeras. La dedicación de su personal es compartida con otras labores e incluso con otras plantas desalinizadoras de características similares.

b) Instalaciones entre los 2.000 m<sup>3</sup>/día y los 10.000 m<sup>3</sup>/día. Son instalaciones para urbanizaciones medianas. La dedicación de su personal es total aunque no existe personal las 24 horas del día. Se suele trabajar en horario de 8 a 15 horas. Por la tarde el personal se da alguna vuelta a la instalación en días alternos por si ocurriese algún problema en dicha planta.

c) Grandes instalaciones desde los 10.000 m<sup>3</sup>/día. Son instalaciones para núcleos urbanos de entidad considerable. La dedicación del personal es total y abarca el día completo.

Nosotros en nuestra T.D. veremos más adelante como calculamos el coste de personal partiendo de los peores casos. Eso quiere decir que calculamos los costes en base a que la planta por muy pequeña que sea, 500 m<sup>3</sup>/día, no está automatizada y necesita personal durante todo el día.

Todo lo comentado anteriormente lleva consigo a tener en cuenta una serie de situaciones que son muy importantes tales como:

a) Se necesita una cantidad de personal mínima que sería una persona por la mañana, otra por la tarde y según convenio dos por la noche.

b) El personal cuenta con 48 días de vacaciones, según el convenio del sector, como consecuencia de que se trabaja los días festivos.

c) Se necesita personal que estará en alerta en función de la anomalía producida en cada momento.

d) El personal que trabaja, totalmente cualificado, deberá de tener una experiencia determinada y contrastada puesto que tendrá que ser capaz de solucionar la situación de avería ante cualquier problema de índole variable.

e) Se ha tenido en cuenta que las retribuciones salariales de todo el personal serán los que se indican en el Convenio Colectivo del sector “Siderometalurgia en la Provincia de Las Palmas” de la Consejería de Empleo, Industria y Comercio, firmado el 26 de junio de 2009 en la Provincia de Las Palmas.

### **2.5.2.5 Coste de Mantenimiento**

En este apartado van incluidas todas las reparaciones necesarias para tener las instalaciones conservadas y en perfecto estado de funcionamiento. Dentro de estas reparaciones hablamos tanto de materiales de mantenimiento, repuestos, lubricantes, como de conservación del entorno.

Evidentemente el personal que se encarga de realizar las operaciones de mantenimiento no se ha considerado en este coste, como consecuencia de que lo tuvimos en cuenta en el coste de personal.

Dentro de lo que se entiende como mantenimiento va incorporado en dicho coste las siguientes actuaciones:

- a) Recipientes y tanques.
- b) Equipos mecánicos.
- c) Equipos de acondicionamiento de máquinas.
- d) Equipos de instrumentación.
- e) Válvulas, tuberías, accesorios y pequeño material.
- f) Equipos eléctricos y bombas.
- g) Obra civil.

En definitiva, podemos resumir que en el apartado de costes de mantenimiento va incluido cualquier reparación necesaria para el funcionamiento correcto de la planta desalinizadora.

El coste de mantenimiento de una planta desalinizadora de O.I. es diferente en la vida útil de la planta, debido a que las reparaciones no ocurren uniformemente a lo largo del tiempo. Según se ha podido observar los estudios realizados, [50], sitúan el coste de mantenimiento entre el 1% y el 2% del valor de la inversión inicial.

En la realidad, los costes de mantenimiento de equipos mecánicos y eléctricos han ido disminuyendo con el tiempo debido a la mejora de la calidad de los materiales y los diseños utilizados por los Ingenieros.

Nosotros, desde un primer momento hemos comentado que no hay que escatimar un solo euro en el gasto de los equipos, como consecuencia de que en función de la calidad de los mismos tendremos la vida útil de la planta desalinizadora.

Una vez aclarado lo anterior, entendemos que el coste de mantenimiento dependerá de determinados factores importantes que a continuación pasamos a describir:

- a) Vida media útil en años del material que precise mantenimiento.
- b) Calidad del material que precise mantenimiento.
- c) Calidad del material que se ha repuesto o añadido.
- d) Tratamiento que recibe el material por los responsables de la planta.
- e) Realización de un mantenimiento preventivo de la planta.

En función de lo anterior, de la documentación estudiada y revisada en esta T.D. y de lo que nos aportan las visitas realizadas a las plantas donde se nos han facilitado datos reales del mantenimiento se podrá obtener unos valores que expresados en porcentajes con respecto al valor inicial de la inversión nos podrá dar un coste real del mantenimiento.

Con respecto a este apartado, existen determinados documentos, [36], donde se aporta el dato de que el coste de mantenimiento está aproximándose a 0,024 €/m<sup>3</sup>. Manuel Hernández Suárez realiza en un artículo un pequeño cálculo de los costes donde para una planta desalinizadora de O.I. de 50.000 m<sup>3</sup>/día obtiene un coste aproximado de 0,012 €/m<sup>3</sup> de agua desalinizada.

#### **2.5.2.6 Coste Medioambiental**

En cualquier proceso de desalinización, existe una porción del agua de alimentación llamada rechazo o salmuera que como sabemos es rechazada por contener gran salinidad y como consecuencia de esto dicha porción de agua es devuelta al lugar donde se recogió el agua bruta a desalinizar.

Un problema tradicional de las plantas desalinizadoras desde su inicio es el no saber qué hacer con dicha agua. Desde los inicios de la desalinización de agua de mar, la salmuera se devuelve a su lugar de origen, es decir, al mar.

Con el paso del tiempo se ha ido observando que el verter la salmuera al mar no es lo más adecuado y ha ido creando una determinada preocupación en los organismos oficiales competentes debido al impacto medioambiental que crea, hasta el punto de que a día de hoy es casi imposible verter la salmuera al mar sin consecuencias para el responsable del vertido.

El agua de alimentación que entra en la planta desalinizadora procedente del mar en las Islas Canarias presenta unos valores de salinidad TDS alrededor de los 38.000 mg/l. La salmuera o el agua de rechazo que vertemos al mar presenta unos valores de salinidad TDS en torno a los 65.000 mg/l. Como se puede comprobar es casi el doble de salinidad la que presenta el agua que se vierte al mar, dependiendo siempre del factor de conversión y de la concentración.

Hasta este momento, no se ha presentado en documento alguno, que tengamos constancia, el tratar como un coste adicional que llamaremos coste medioambiental el vertido de la salmuera.

La solución que damos para evitar que la salmuera tal como queda en la planta desalinizadora después del proceso de ósmosis inversa sea vertida al mar es la de mezclarla con agua de mar sin ser tratada.

Como consecuencia de lo anterior, existirá un coste añadido que como hemos dicho lo llamaremos coste medioambiental y que estará formado por las siguientes partidas:

a) Bomba de impulsión de agua para realizar la mezcla de las aguas correspondiente al vertido y al agua de mar no tratada.

b) Canalizaciones o colectores de impulsión y expulsión para enviar el agua ya mezclada con salinidad menor al mar a una distancia prudencial.

Ya se observará con más detalle en el apartado dedicado al cálculo del coste medioambiental cómo se ha realizado el cálculo adecuado para la canalización y para las bombas de impulsión.

### 2.5.2.7 Coste del Consumo Energético

El coste de la energía, o lo que es lo mismo, el coste del consumo energético para desalinizar agua de mar mediante ósmosis inversa es un factor importantísimo, puede variar desde un 30% hasta un 40% en los peores casos. De hecho es el que nos va a determinar de alguna manera el coste en €/m<sup>3</sup> de venta del agua. En función de la tecnología que se utilice varía mucho el valor del consumo energético.

El consumo energético es el coste más importante y más elevado que se genera en una planta desalinizadora de O.I., por lo que, todas las investigaciones van encaminadas en la disminución del mismo.

A la hora de estudiar el consumo energético se estudian 2 valores muy importantes.

Por un lado, tenemos que saber con exactitud el consumo energético de la planta desalinizadora en todas sus fases por unidad de volumen, es decir, tenemos que conocer cuantos kWh/m<sup>3</sup> se consumen en la totalidad de la planta desalinizadora, desde que se adquiere el agua de alimentación y entra en la planta hasta que llega a los diferentes consumidores.

Por otro lado, tenemos que conocer con exactitud lo que cuesta la energía eléctrica en kWh, es decir el precio de mercado en €/kWh.

Una vez que conocemos los datos anteriores bastará una simple multiplicación de las dos cantidades anteriores para conocer lo que cuesta el consumo energético en €/m<sup>3</sup>.

Como veremos a lo largo de este apartado es más complicado de lo que parece inicialmente, aunque tendremos en esta T.D. el valor exacto de este tipo de coste.

#### a) Consumo energético en la planta desalinizadora de ósmosis inversa

El consumo de energía que se genera en la planta desalinizadora se subdivide en cuatro fases bien diferenciadas en lo que es la producción de agua desalinizada. Estas cuatro fases corresponden al consumo energético en la captación del agua de mar, al consumo energético en lo que es el proceso de la desalinización propiamente dicho, es decir, lo que llamamos la ósmosis inversa, al consumo energético de las pequeñas bombas en el interior de la planta, que denominamos consumo intermedio y al consumo energético en lo que es el bombeo del agua al exterior, es decir, lo que sería llevar el agua desde la planta hasta los consumidores. Aunque parezca un poco contradictorio, la realidad es que es muy importante conocer a priori a qué zona inicialmente se le va a abastecer de esta agua, puesto que no es lo mismo impulsar el agua a

una zona que se encuentre a nivel del mar que tener que impulsar el agua a una zona que se encuentre en una cota de 65 metros sobre el nivel del mar. Por tanto, el bombeo al exterior se debe conocer desde un inicio.

Es importante tener en cuenta que en lo que respecta al funcionamiento de la planta desalinizadora tendríamos que adecuarnos a los tres primeros consumos, puesto que con ellos la planta generaría agua desalinizada y funcionaría sin problema alguno. Otro apartado sería el bombearla a cotas muy elevadas, que podría ser perfectamente otra empresa diferente a la que produce el agua desalinizada.

En función de lo anterior explicamos a continuación cada uno de los consumos energéticos comentados.

#### **a.1) Consumo energético en la captación de agua de mar**

Dicho consumo es el primero que se origina y es el que se produce como consecuencia de la impulsión del agua de mar desde el pozo playero hasta la entrada en la planta desalinizadora.

Según documentos, [48-49] que corresponden a las tablas 4 y 5, se define que dicho consumo está en valores próximos a 0,6 KWh/m<sup>3</sup> de media.

#### **a.2) Consumo energético en el proceso de la desalinización por ósmosis inversa**

Es el consumo energético del proceso de la desalinización por ósmosis inversa propiamente dicho. Dicho consumo es el que va desde que el agua ha llegado a la planta desalinizadora hasta que es llevada al depósito de almacenamiento en la misma planta desalinizadora, sin salir de ella.

Según los documentos, [48-49], que corresponden a las tablas 4 y 5, cuando el sistema de recuperación era a base de Turbinas Pelton, dichos consumos presentaban valores medio que rondaban los 3,1 kWh/m<sup>3</sup>. Cuando se introdujeron los intercambiadores de presión o cámaras isobáricas los valores de dicho consumo bajaron hasta los 2,6 kWh/m<sup>3</sup>.

A día de hoy, y según la tabla 6, de elaboración propia, al introducirse como sistema de recuperación de energía los sistemas R.O. Kinetic, DWEER y ERI-PX, los valores se han reducido notablemente para llegar a franjas que oscilan sobre los 2,0 kWh/m<sup>3</sup> de valor medio para plantas desalinizadoras de 30.000 m<sup>3</sup>/día en adelante.

Este apartado como todos los costes se estudiará detenidamente y con mucho detalle en el apartado de investigación de nuestra T.D., para confirmar los valores mostrados con anterioridad.

### **a.3) Consumo energético en el intermedio**

En las plantas desalinizadoras existen una serie de pequeñas bombas que pertenecen a la dosificación de los reactivos químicos y a la impulsión del agua del depósito de agua de alimentación y del depósito de agua tratada. En los distintos artículos leídos le denominan consumo de pérdidas y varios, aunque nosotros le hemos denominado intermedio como consecuencia de que actúan en el intermedio del proceso. Los valores observados hasta este momento indican que están próximos a 0,12 kWh/m<sup>3</sup> de media.

### **a.4) Consumo energético en el bombeo al exterior**

El último consumo energético que como se comentó anteriormente no pertenece a la planta desalinizadora, en base a que ya el agua está desalinizada, es el consumo que se encarga del reparto de la misma, es el que lleva el agua una vez desalinizada y situada en depósitos en la planta desalinizadora a los consumidores, independientemente de la cota a la que esté ubicado el punto de consumo.

Según los documentos, [48-49], que corresponden a las tablas 4 y 5, el valor del consumo energético oscila entre los 0,23 y 0,3 kWh/m<sup>3</sup> de valor medio.

El consumo energético del bombeo a los diferentes puntos de consumo está basado en el cálculo de la bomba o las bombas que son necesarias para impulsar el agua producto. El cálculo de la bomba lo haremos en base a la siguiente expresión matemática:

$$P(\text{CV}) = \frac{1,25 \cdot Q \cdot \rho \cdot H}{4500 \cdot \eta}$$

siendo:

Q: caudal en l/min

$\rho$ : densidad el agua=1,025 g/cm<sup>3</sup>

H: Altura total en m.c.a.

$\eta$ : Rendimiento total del grupo de 0,80

En base a que en las 24 horas del día no se está bombeando agua a los consumidores,  $Q'$  estará en función de las horas de bombeo, por lo que se regirá por la siguiente ecuación:

$$Q' = Q_p \times N_h / 24$$

siendo:

$Q_p$ : caudal de producción en l/min

$N_h$ : número de horas en las que se bombea el agua al consumidor

Dado que la presión requerida a la llegada de cada punto de consumo es 10 m.c.a., tendremos que:

$$H = 10 + h + p$$

siendo:

h: altura manométrica en m.c.a.

p: pérdidas en m.c.a.

Las pérdidas serán la suma de las pérdidas de carga por fricción que son 0,020 m.c.a. por cada metro de recorrido horizontal mas las pérdidas como consecuencia de los codos y demás accesorios en la totalidad del recorrido, que corresponden a una valor de 10 m.c.a., por lo que las pérdidas totales serían:

$$p = 0,020 \cdot L + 10$$

Como consecuencia de que en nuestra T.D. se ha definido un coste nuevo llamado medioambiental, y el mismo depende de una bomba que impulsa el agua mezclada con agua sin desalinizar, tendremos un consumo energético adicional que corresponderá al consumo eléctrico de dicha bomba. En el apartado dedicado al consumo energético se calculará dicho consumo adicional.

## **b) Coste de la energía eléctrica**

El coste de la energía eléctrica ha ido variando considerablemente a lo largo de la última década. En una época existían dos categorías de mercado o consumidores, que respondían a consumidores de tarifas básicas y consumidores en mercado liberalizado. En dicha época la factura estaba desglosada en los siguientes términos:

- Término de potencia.  $T_p$
- Término de energía consumida.  $T_e$
- Complemento de energía reactiva y discriminación horaria.
- Impuesto electricidad.
- Alquiler del equipo de medida y servicio de lectura.
- I.G.I.C. sobre la totalidad anterior.

Las grandes plantas desalinizadoras, contratan el suministro eléctrico en alta tensión, lo que lleva consigo un ahorro económico. Nosotros, aunque estamos investigando en la franja que va desde los 500 a los 15.000 m<sup>3</sup>/día, partimos de la base de que la contratación del suministro eléctrico es también en alta tensión.

El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, documento [55], en el boletín oficial del Estado número 315, publica la Orden ITC/3519/2009, de 28 de diciembre, por la que se revisan los peajes de acceso a partir de 1 de enero de 2010 y las tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial. A través de dicha Orden, queda regulado el suministro eléctrico y quedan definidos todos los parámetros relacionados anteriormente.

El Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, documento [56], en el boletín oficial del Estado número 77, publica la Orden ITC/688/2011, de 30 de marzo, por la que se establecen los peajes de acceso a partir de 1 de abril de 2011 y determinadas tarifas y primas de las instalaciones del régimen especial. A través de dicha Orden vuelve a quedar regulado el suministro eléctrico. Esta nueva Orden es por la que se rige actualmente el suministro eléctrico, liberalizando a su vez el mismo.

En el apartado 1.2 de dicho documento, [56], hace mención a los precios de los términos de potencia y términos de energía y a las tarifas de acceso para suministros efectuados en alta tensión con potencia contratada mayor a 10 kW.

En base al párrafo anterior, tenemos un tipo de producto, que es el 3.1A, TP + DH3, basado en un término de potencia y añadiéndole el precio fijo de la energía con la discriminación horaria. Los valores son los siguientes en €:

|                                   | Periodo Tarifario 1 | Periodo Tarifario 2 | Periodo Tarifario 3 |
|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>T<sub>p</sub> €/kWh año</b>    | 24,493015           | 15,104184           | 3,463562            |
| <b>T<sub>e</sub> en DH3 €/kWh</b> | 0,134025            | 0,116987            | 0,081679            |

Tabla 9. Coste de los términos de potencia y de energía en AT. [56]

En la tabla 9, anterior, los periodos tarifarios 1, 2 y 3 son los que se denominan periodos en horas punta, llano y valle. Como consecuencia de que nuestra planta desalinizadora trabaja 24 horas al día, da igual cual es cada periodo. Lo que si tenemos en cuenta son las horas que se le asignan a cada uno.

Periodo tarifario 1 (P1 punta): de 18 a 22 horas. 4 horas efectivas.

Periodo tarifario 2 (P2 llano): de 8 a 18 horas y de 22 a 24 horas. 12 horas efectivas.

Periodo tarifario 3 (P3 valle): de 0 a 8 horas: 8 horas efectivas.

A los valores anteriores hay que sumarles los siguientes factores:

- a) El impuesto eléctrico 1,05113x4,864 c€.
- b) El alquiler del equipo de medida, 48,11 €/mes.
- c) El I.G.I.C. reducido, actualmente el 3%.

En base a lo definido en esta apartado y teniendo en cuenta los consumos de la totalidad de los bombeos se calculará más adelante el consumo energético total para la planta desalinizadora de agua de mar mediante O.I..

# CAPITULO 3

## El Agua



## Capítulo 3. El Agua

### 3.1 Introducción

Una vez que hemos descrito el proceso tecnológico de la O.I. y hemos realizado un primer análisis de los costes, entendemos que antes de introducirnos en la investigación total y absoluta de nuestra T.D., debemos dedicar un capítulo especial al agua, puesto que, es el líquido elemento fundamental y básico, sabiendo que sin él nuestra T.D. carece de sentido.

Comentaremos entonces cuáles son las características fundamentales del agua de mar que rodea a las Islas Canarias y también hablaremos qué condiciones debe reunir y que legislación hay que aplicar al agua producto de la planta desalinizadora de O.I. para que pueda ser consumida.

También exponemos las características fundamentales que van a tener el agua de rechazo, concentrado o salmuera y el agua producto o permeado.

### 3.2 Características principales del Agua de Mar/Rechazo/Producto

Según los análisis realizados al agua de mar en determinados puntos de nuestro archipiélago de las Islas Canarias, el agua de mar que nos rodea tiene las siguientes características:

| Elemento/Compuesto               | Cantidad (mg/l) |
|----------------------------------|-----------------|
| Potasio (K)                      | 451             |
| Sodio (Na)                       | 11.435          |
| Magnesio (Mg)                    | 1.523           |
| Calcio (Ca)                      | 451             |
| Carbonatos (CO <sub>3</sub> )    | 27              |
| Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> ) | 250             |
| Cloruros (Cl)                    | 20.800          |
| Fluor (F)                        | 1,3             |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> )      | 3.110           |

|                                       |                  |
|---------------------------------------|------------------|
| Sílice (SO <sub>2</sub> )             | 5                |
| Boro (B)                              | 4.5              |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | 1.4              |
| TDS                                   | 38.080           |
| pH                                    | variable (7,5-8) |

Evidentemente, éstos valores pueden oscilar ligeramente según la zona donde se recoja la muestra, aunque si está claro que las mismas no son significativas y por tanto no alteran los datos con los que se ha trabajado y por supuesto no influyen en los resultados de nuestra T.D.. Es importante hacer notar, que además de haber recogido los datos de análisis químicos, los hemos comparado con los datos de las características del agua de mar que se encuentran en el documento [57], que corresponde al proyecto de una planta desalinizadora por ósmosis inversa, observando que prácticamente son los mismos.

El agua de rechazo, que es lo mismo que hablar de concentrado o salmuera que corresponde al agua que se vierte nuevamente al mar suele presentar las siguientes características, si bien, las mismas pueden oscilar en cantidades mayores con respecto a lo que oscilaba el agua de mar o alimentación.

| Elemento/Compuesto                    | Cantidad (mg/l) |
|---------------------------------------|-----------------|
| Potasio (K)                           | 776             |
| Sodio (Na)                            | 19.680          |
| Magnesio (Mg)                         | 2.624           |
| Calcio (Ca)                           | 777             |
| Carbonatos (CO <sub>3</sub> )         | 49              |
| Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )      | 424             |
| Cloruros (Cl)                         | 35.808          |
| Fluor (F)                             | 2,3             |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> )           | 5.361           |
| Sílice (SO <sub>2</sub> )             | 8,6             |
| Boro (B)                              | 7,3             |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | 2,9             |
| TDS                                   | 65.552          |
| pH                                    | 8               |

Por último, presentamos las características que presenta el agua producto antes de salir de la planta desalinizadora de O.I.. Dichas características, determinadas veces deben ser modificadas con algún reactivo o postratamiento al final, como puede ser el ajuste de pH. De todas maneras, en el apartado siguiente mostraremos las características necesarias que debe tener cualquier tipo de agua para que sea potable y por tanto pueda ser consumida, aunque en este apartado nos adelantamos y comentamos las características que en general presenta dicha agua producto.

| Elemento/Compuesto                    | Cantidad (mg/l)  |
|---------------------------------------|------------------|
| Potasio (K)                           | 2,25             |
| Sodio (Na)                            | 49,5             |
| Magnesio (Mg)                         | 1,5              |
| Calcio (Ca)                           | 0,44             |
| Carbonatos (CO <sub>3</sub> )         | 0                |
| Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )      | 1,5              |
| Cloruros (Cl)                         | 82               |
| Fluor (F)                             | 0,01             |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> )           | 1,22             |
| Sílice (SiO <sub>2</sub> )            | 0,03             |
| Boro (B)                              | 0,67             |
| Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) | 1,77             |
| TDS                                   | tope máximo 500  |
| pH                                    | variable sobre 7 |

Como hemos comentado, estas características que hemos presentado del permeado, son las que obtenemos a la salida de la ósmosis inversa. Si alguna de las anteriores no cumpliera con la normativa vigente, se tratará en lo que llamamos postratamiento para que dicha agua pueda ser consumida. Es decir, remineralización, ajuste del pH a valores adecuados... etc. Debemos tener en cuenta siempre que el agua que sale de la planta desalinizadora tiene que ser un producto que cumpla con todos los requisitos que debe tener un agua potable.

### 3.3 Calidad del agua potable

Muchas han sido las leyes y normativas elaboradas y dictadas para asegurar que el agua que se consume es apta a lo largo de la historia. Hemos leído, adaptado y revisado con anterioridad parte de la misma. [58]

Nosotros evidentemente nos vamos a regir por la que se encuentra actualmente en vigor y que la aprobó el Ministerio de la Presidencia a través del REAL DECRETO 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. [59]

La ley 14/1986, de 25 de abril, General de Sanidad, estableció la obligación de orientar sus actuaciones hacia la promoción de la salud y la prevención de enfermedades. Dicha Ley establecía que cualquier producto que pudiese tener consecuencia negativa para la salud debía pasar un control. [60]

El REAL DECRETO 1138/1990, de 14 de septiembre, aprueba el control de la calidad de las aguas potables para el consumo humano. [61]

El REAL DECRETO 140/2003, establece los criterios de calidad del agua de consumo humano, los programas de control de calidad y los tratamientos de potabilización del agua de consumo humano. En definitiva, este último Real Decreto nos informa de una manera exhaustiva sobre la calidad, el control y los tratamientos que debe tener el agua para que sea apta para el consumo humano.

A continuación vamos a exponer los valores más importantes que establece el vigente REAL DECRETO anteriormente mencionado.

| Elemento/Compuesto          | Cantidad (mg/l) |
|-----------------------------|-----------------|
| Sodio (Na)                  | <b>200</b>      |
| Magnesio (Mg)               | <b>30-50</b>    |
| Calcio (Ca)                 | <b>200</b>      |
| Cloruros (Cl)               | <b>250</b>      |
| Fluor (F)                   | <b>1,5</b>      |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) | <b>250</b>      |
| Sílice (SO <sub>2</sub> )   | <b>5</b>        |

|          |                       |
|----------|-----------------------|
| Boro (B) | <b>1</b>              |
| TDS      | <b>máximo 500</b>     |
| pH       | <b>variable 7-8,5</b> |

Evidentemente, en todos los resultados obtenidos como resultado de nuestra investigación, nuestra agua producto o permeado está dentro de los valores que marca la normativa vigente, y en este caso particular, el REAL DECRETO 140/2003.



# **CAPITULO 4**

## **Objetivos Previos**



## Capítulo 4. Objetivos Previos

En unas primeras investigaciones, como objetivo previo y antes de introducirnos en el estudio exhaustivo del estado del arte en la tecnología de las plantas desalinizadoras mediante O.I., y más aún en el estudio del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada que hemos descrito en los capítulos anteriores, nos trazamos el estudiar la desalinización de agua de mar mediante la O.I., en un rango comprendido entre los 500 y 15.000 m<sup>3</sup>/día. En estos primeros estudios detectamos que si bien existen datos e investigaciones con respecto a los costes de grandes plantas desalinizadoras, a partir de 15.000 m<sup>3</sup>/día, sigue siendo algo relativamente escaso lo investigado dentro de nuestro rango y lo que se ha recogido en nuestro estado del arte que comentamos a continuación viene referido sobre los finales de los años 90 y principios del 2000, lo que hace que los últimos datos relacionados con nuestra investigación tengan más de 10 años.

Por otro lado, resulta ineludible que estando en una Isla de estas características y rodeados de agua por todas partes, el Estado y la Comunidad Autónoma se involucren en obtener agua potable a través del agua de mar y desalinizarla por el método de la O.I..

En lo visto y estudiado hasta este momento, existen investigaciones generales y algunas publicaciones con datos relacionados sobre el aspecto económico del agua desalinizada por O.I., si bien, dichas investigaciones utilizan como sistema de recuperación de energía la turbina y el agua de rechazo es vertida directamente al mar, lo que implica una reducción del coste total.

Como objetivos previos nos hemos trazados los siguientes:

a) Estudiar en profundidad la instalación completa de una planta de ósmosis inversa para con ello poder diversificar y separar esos grandes costes que hemos comentado con anterioridad y poder optimizar los factores que afectan a cada uno de ellos dentro del rango comprendido entre los 500 y 15.000 m<sup>3</sup>/día.

b) También como objetivo previo nos hemos trazado el optimizar los diseños de las plantas desalinizadoras estudiando uno por uno los factores que afectan al diseño definitivo.

c) Como último objetivo previo vamos a realizar un estudio de los costes bajo la perspectiva planteada, optimizando cada uno de ellos, dentro del rango comentado.

Es por este motivo por el que nos adentramos en esta T.D. y nos introducimos en el trabajo amplio, extenso y arduo de la búsqueda bibliográfica que presentamos en el capítulo siguiente.

# **CAPITULO 5**

## **Revisión Bibliográfica**



## Capítulo 5. Revisión Bibliográfica

### 5.1 Investigación bibliográfica

Evidentemente, a la hora de iniciar la investigación bibliográfica para obtener las referencias bibliográficas señaladas más adelante, hemos tenido que ir paso a paso con un esquema adecuado para no desviarnos del trabajo de investigación a realizar y obtener los objetivos definitivos de nuestra T.D.. Se ha repasado y estudiado meticulosamente las investigaciones realizadas hasta este momento relacionadas con los costes de la desalinización del agua mar, con todo lo relacionado con la ósmosis inversa y los rangos de producción investigados hasta este momento.

Las actuaciones que hemos realizado para culminar la investigación bibliográfica son las siguientes:

- a) Búsqueda y lectura de las T.D. relacionadas con nuestra idea. En la bibliografía se encuentran las que hemos estudiado y comentado alguna referencia en la T.D.. Así mismo relacionamos a continuación las relacionadas en los últimos 5 años:
  - a.1) Déniz Quintana Fabián A. “Análisis estadístico de los parámetros DQO, DBO5 y SS de las aguas residuales urbanas en el ensuciamiento de las membranas de ósmosis inversa”. (febrero de 2010) [62]
  - a.2) Argudo Espinosa Celso. “Concepción integral y aplicación experimental de procesos de membranas en reutilización de aguas depuradas”. (abril de 2011)[63]
  - a.3) Ruiz Saavedra Enrique. “Análisis de procesos de membranas. Desalinización de aguas salobres”. (julio de 2011) [64]
  - a.4) García Latorre Francisco Javier. “Análisis y simulación de la tecnología de la O.I. con fuentes energéticas no convencionales”. (enero 2013) [65]
- b) Búsqueda y lectura de documentos diversos a través de la Biblioteca Digital de la ULPGC que nos pudieran interesar.
- c) Acceso a los abstracts de los documentos mediante palabras relacionadas con el coste del agua desalinizada en general. Todos los abstracts que han sido de interés nos ha llevado a estudiar el artículo en su totalidad y posteriormente han pasado a ser parte de nuestra bibliografía.

- d) Revisión total de revistas relacionadas con nuestro tema, como pueden ser Desalination, Ingeniería Química, Tecnología del agua, Desalination and water treatment, etc.....
- e) Estudio de catálogos y manuales de usuario de diferentes fabricantes y de la totalidad de los componentes que forman parte de una planta desalinizadora de O.I. mediante los cuales se ha podido realizar los cuadros de precios actualizados.
- f) Solicitud al Centro de Información y Documentación de la ULPGC de determinados artículos y revistas que inicialmente no se tenía acceso.
- g) Búsqueda exhaustiva de libros y documentos relacionados con nuestra idea en la Biblioteca de la ULPGC. En la bibliografía se encuentran los que nos han aportado sus conocimientos para la redacción de nuestro trabajo de investigación.
- h) Reuniones, charlas, debates y mesas redondas con los Ingenieros encargados de las plantas desalinizadoras de O.I. para obtener sus ideas, sus posiciones, y según ellos el camino que llevará la desalinización de agua de mar en el futuro. En este caso, se ha estado en contacto con los Ingenieros de las plantas de Anfi de Mar, Anfi tauro, Bonny, Puerto Rico, Salinetas y Sureste.
- i) Revisión de documentos relacionados con nuestra idea a nivel de Internet en los países que paralelamente a España se han ido introduciendo en la tecnología de la desalinización de agua de mar.
- j) Búsqueda y lectura de los Proyectos Finales de Carrera relacionados con nuestra idea y realizados en la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Relacionamos a continuación los mismos:
  - j.1) Lorente Arencibia Tomas. "Evaluación del Impacto Ambiental de la desalación de agua de mar en Gran Canaria". (2009)
  - j.2) Rodríguez Díaz Gonay. "Diseño y cálculo de una planta desalinizadora de ósmosis inversa para el abastecimiento del centro penitenciario de Juan Grande". (2010)
  - j.3) Ginory García OLiver. "Estudio económico comparativo de los distintos sistemas de recuperación de energía de la salmuera de plantas desalinizadoras de ósmosis inversa". (2008)
- k) Reuniones, charlas, debates y actualización de la documentación en los Congresos internacionales celebrados en Barcelona en abril de 2012 y en The Netherlands en septiembre de 2012.

## 5.2 Revisión bibliográfica

Una vez que los objetivos previos quedaron claros y que investigamos profundamente la bibliografía que se adjunta al final de esta T.D., hemos observado lo siguiente:

a) Los costes de la desalinización de agua de mar mediante la tecnología de O.I. están basados en seis grandes unidades: amortización del capital, energía eléctrica, personal, mantenimiento, reposición de membranas y consumo de reactivos químicos. Las tres primeras se consideran costes fijos y las tres segundas se consideran costes variables.

b) Los resultados de las investigaciones y estudios que se han presentado hasta ahora corresponden a grandes plantas desalinizadoras, a determinados estudios basados en prototipos realizados en Universidades y dentro del rango nuestro las investigaciones realizadas se basan en tecnologías de finales de los años 90.

c) Prácticamente las investigaciones realizadas hasta este momento, reflejan situaciones, características y realidades algo desfasadas con respecto a las fechas en las cuales nos encontramos.

d) No se han encontrado estudios que nos definan los costes en función del diseño de la planta y dentro del rango comentado en producciones tales como los 7.500 y 12.000 m<sup>3</sup>/día.

e) Los costes presentados hasta este momento responden a investigaciones, experiencias y a datos aportados por los responsables de las plantas desalinizadoras.

f) En los resultados aportados en los documentos revisados hasta este momento se observa que carecen de fórmulas, ecuaciones y criterios matemáticos que puedan servir para adaptarlos a otras plantas desalinizadoras, aunque si bien, somos concientes de que aunque no se especifiquen, realmente existen.

## 5.3 Estado del arte

En este apartado de nuestra T.D. vamos a realizar un pequeño recorrido de lo que ha ocurrido en los últimos 10-12 años, en relación al agua desalinizada mediante O.I. y la repercusión en el coste que han ido teniendo los factores de la instalación.

En el año 1999, en el Congreso Nacional Gestión del Agua en Cuencas Deficitarias, se presenta un artículo de David Martínez Vicente, Melchor Senent Alonso y Juan Manuel Cortejosa

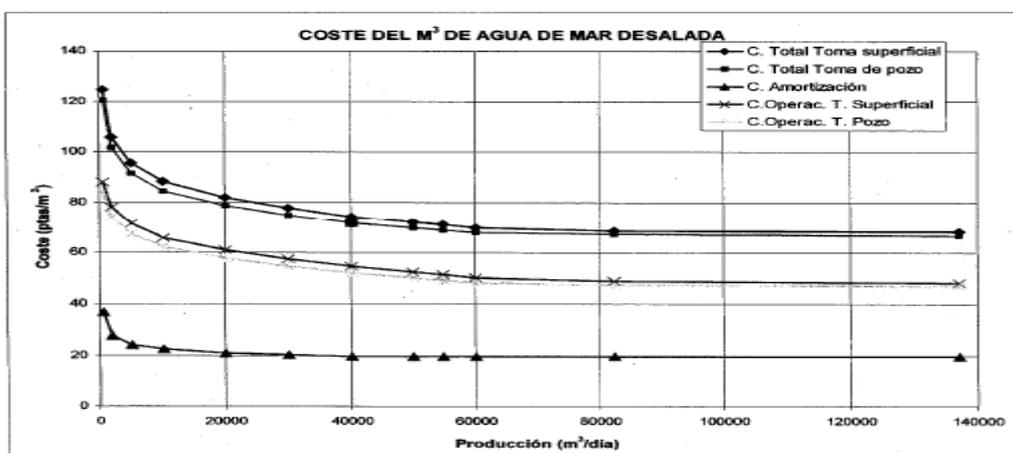
Olivo titulado “Los costes de la desalinización del agua de mar” en el cual ponen de manifiesto que existe un coste de capital que es básicamente la inversión y nos informan sobre la amortización del mismo en función de los años, un coste de explotación basado en el personal, el mantenimiento, la reposición de membranas, la reposición de filtros de cartuchos, los productos químicos y la energía. A partir de estos datos generan una serie de curvas en función de la capacidad de las plantas. Es muy importante hacer notar que en dicho artículo, para las pequeñas plantas nos comenta que determinados costes como puede ser el de personal o el de mantenimiento, tienen carácter orientativo y estimativo por la falta de datos.

En la tabla 10 se pueden observar los valores a los que hacemos referencia, teniendo en cuenta que la unidad de coste es en pesetas. En la gráfica 12 se pueden observar los costes totales, mencionando que se han realizado en base a que la inversión inicial se ha realizado sin subvenciones ni aportaciones iniciales y en base al precio de la energía de 7 ptas/kWh. [33]

**COSTE TOTAL DEL M<sup>3</sup> DE AGUA DE MAR DESALADA**

| Producción (m <sup>3</sup> /día)     | 500      | 2.000    | 5.000 | 10.000  | 20.000 | 30.000  | 40.000 | 50.000  | 54.800  | 60.000 | 82.200  | 137.000 |
|--------------------------------------|----------|----------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|---------|
| <b>COSTES DE INVERSIÓN</b>           |          |          |       |         |        |         |        |         |         |        |         |         |
| <i>Inversión (Mptas)</i>             | 84       | 250      | 550   | 1.020   | 1.900  | 2.760   | 3.600  | 4.500   | 4.392   | 5.400  | 7.398   | 12.330  |
| <i>Amortización<sup>1</sup></i>      | 36,93    | 27,48    | 24,18 | 22,42   | 20,89  | 20,23   | 19,79  | 19,79   | 19,79   | 19,79  | 19,79   | 19,79   |
| <b>COSTES DE OPERACIÓN</b>           |          |          |       |         |        |         |        |         |         |        |         |         |
| <b>Personal</b>                      | 30,5     | 23,2     | 17,6  | 13,4    | 10,2   | 7,7     | 5,9    | 4,5     | 4,0     | 3,4    | 3,0     | 2,8     |
| <b>Mantenimiento</b>                 | 6,86     | 5,14     | 4,52  | 4,19    | 3,90   | 3,78    | 3,70   | 3,70    | 3,62    | 3,70   | 3,54    | 3,50    |
| <b>Reposición membranas</b>          | 3,84     | 3,84     | 3,70  | 3,56    | 3,42   | 3,15    | 2,88   | 2,68    | 2,65    | 2,47   | 2,50    | 2,47    |
| <b>Productos químicos</b>            | 6,5-10,7 | 6,2-10,3 | 6-9,9 | 5,5-9,1 | 5-8,2  | 4,5-7,4 | 4-6,6  | 3,5-5,8 | 3,2-5,3 | 3-4,9  | 2,7-4,2 | 2,5-3,9 |
| <b>Energía Eléctrica<sup>2</sup></b> | 35,7     | 35,7     | 35,7  | 35,7    | 35,7   | 35,7    | 35,7   | 35,7    | 35,7    | 35,7   | 35,7    | 35,7    |
| <b>Total costes de operación</b>     | 84-88    | 74-78    | 67-71 | 62-66   | 58-61  | 55-57   | 52-55  | 50-52   | 49-51   | 48-50  | 47-49   | 47-48   |
| <b>COSTE TOTAL DEL M<sup>3</sup></b> | 121-125  | 101-106  | 92-95 | 85-88   | 79-82  | 75-78   | 72-74  | 70-72   | 69-71   | 68-70  | 67-69   | 67-68   |

Tabla 10. Coste total del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada. [33]



Gráfica 12. Coste total del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada. [33]

En el año 2001, en el mes de enero, a requerimiento del Gobierno de Aragón, se publica un documento realizado por Antonio Valero, Javier Uche y Luís Serra titulado “La Desalinización como alternativa al Plan Hidrológico Nacional”. Dicho documento se inicia comentando cada uno de los procesos de desalinización. A continuación hace unas breves reseñas de la historia de la desalinización y comenta un poco sobre la desalinización en España. Para finalizar, comenta los costes de la desalinización, nombrando el coste de la energía eléctrica, la inversión y la amortización y por último comenta un apartado de otros costes donde introduce los productos químicos, las membranas, la mano de obra y el mantenimiento. Este documento presenta unos costes totales entre 0,36 y 0,39 €/m<sup>3</sup>. [66]

En el año 2001, la revista Desalination, en su número 133, publica un artículo de Andreas Poullikkas. En este artículo se especifica como costes fundamentales en las plantas desalinizadoras, el coste del capital inicial invertido, el coste de la energía eléctrica y el coste de operación y mantenimiento. Este último coste lo subdivide en personal, membranas y productos químicos. Para finalizar este artículo se presentan los costes anteriormente mencionados. Para el caso más óptimo obtiene un coste de 0,4412 \$/m<sup>3</sup>. [67]

En el año 2001, la revista Desalination, en su número 137, publica un artículo de D. Prats Rico y M. F. Chillón Arias que nos comentan algunos resultados de los primeros años de funcionamiento (1997, 1998 y 1999) de la planta desalinizadora por O.I. en la Universidad de Alicante. Dicha planta se construyó en 1996 y comenzó a funcionar en 1997. En dicho artículo se comenta que el coste del agua desalinizada pasa de 0,22 €/m<sup>3</sup> a 0,19 €/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta dentro de los factores de costes principales la energía, el mantenimiento y las membranas. Es importante tener en cuenta que al ser un prototipo de planta situada en una universidad, existen muchos factores como puede ser el coste de bombeo o de personal que no se han contabilizado o añadido al coste total. Dicho coste pertenece solamente al proceso de O.I.. [68-70]

En el año 2002, la revista Agricultura presenta un artículo de María Amparo Melián Navarro y José María Cámara Zapata en el cual se comenta sobre las técnicas de desalinización y sus costes, y se pone de manifiesto que en el año 2001, el coste del agua desalinizada de mar por ósmosis inversa rondaba entre 0,42 €/m<sup>3</sup> y 0,84 €/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta los costes de energía, inversión, mantenimiento, productos químicos y membranas. [71]

En el año 2002, la revista *Desalination*, en su número 142, publica un artículo de S.A. Avlonitis en el cual se estudia los costes de agua de mar desalinizada mediante O.I. en pequeñas plantas de las Islas Griegas. Tienen presente como factores de coste la energía, el personal, el mantenimiento, los productos químicos y la sustitución de membranas y filtros. Llega a la conclusión de que el coste en el mejor de los casos es de 0,6 \$/m<sup>3</sup> y hace una pequeña referencia a las Islas Canarias comentando que el coste para una planta de 36.000 m<sup>3</sup>/día esta en torno a los 1,62 \$/m<sup>3</sup>. Adjuntamos la tabla 11 con el dato recogido. [72-75]

|   | Localidad      | Tecnología | Capacidad, m <sup>3</sup> /d | Agua de Alimentación     | Coste, \$/m <sup>3</sup> |
|---|----------------|------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | Malta          | OI         | 15.000                       | Agua de mar              | 1,18                     |
| 2 | Islas Canarias | OI         | 36.000                       | Agua de mar              | 1,62                     |
| 3 | Bahrein        | MSF        | 23.000                       | Agua de mar              | 0,56                     |
| 4 | Florida        | OI         | 46.000                       | Agua salobre, 5.000 mg/l | 0,267                    |
| 5 | Arabia Saudí   | OI         | 57.000                       | Agua de mar              | 0,48                     |

Tabla 11. Coste de agua desalinizada. [72]

En el año 2002, la revista *Desalination*, en su número 143, publica un artículo de Y. Al-Wazzan, M. Safar, S. Ebrahim, N. Burney y A. Mesri en el cual trata de la desalinización mediante ósmosis inversa de agua obtenida en el subsuelo en la zona de Kuwait. Llegan a la conclusión de un coste de 0,776 \$/m<sup>3</sup> teniendo como principales gastos en coste de capital, la maquinaria y la obra civil, en el caso de costes de operación, la electricidad, los filtros, los productos químicos y la mano de obra y un pequeño apartado de costes de mantenimiento. [76]

En el año 2002, la revista *Desalination*, en su número 153, publica un artículo de Azza Hafez y Samir El-Manharawy en el cual se estudia para la región del Mar Rojo en Egipto una aproximación sobre el coste del agua desalinizada. El valor óptimo dentro de todas las estimaciones realizadas es de 0,86 \$/m<sup>3</sup>. [77-82]

En el año 2002, David Martínez Vicente presenta en la Universidad de Murcia su T.D. titulada "Estudio de la viabilidad técnico-económica de la desalinización de agua de mar por O.I. en España". En dicho documento se trata prácticamente la totalidad de los costes en las plantas desalinizadoras de ósmosis inversa, si bien, en base a sus investigaciones y datos aportados por los responsables de las plantas. El documento hace referencia a grandes plantas desalinizadoras, tratando su investigación en España y en la franja que va desde los 10.000

hasta los 140.000 m<sup>3</sup>/día. Sus estudios de investigación realizados les lleva a presentar unos valores de costes totales de 55,76 c€/m<sup>3</sup> para una planta de 10.000 m<sup>3</sup>/día con toma en pozo playero y de 40,95 c€/m<sup>3</sup> para una planta de 140.000 m<sup>3</sup>/día con idéntica toma. Adjuntamos en la tabla 12 siguiente los valores presentados en su T.D.. [50]

| COSTE TOTAL DEL M <sup>3</sup> DE AGUA DE MAR DESALADA (cent€/m <sup>3</sup> ). |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |                    |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| Producción (m <sup>3</sup> /día)  | 10.000             | 20.000             | 40.000             | 60.000             | 80.000             | 100.000            | 120.000           | 140.000            |
| <b>COSTES DE INVERSIÓN</b>  |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |                    |
| Inversión (Millones €)  | 6                  | 12                 | 24                 | 36                 | 48                 | 60                 | 72                | 84                 |
| Amortización <sup>1</sup>   | 16,52              | 16,52              | 16,52              | 15,52              | 16,52              | 16,52              | 16,52             | 16,52              |
| <b>COSTES DE OPERACIÓN</b>  |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                   |                    |
| Personal  | 14,66              | 7,33               | 3,67               | 2,46               | 1,80               | 1,44               | 1,20              | 1,02               |
| Mantenimiento   | 1,71-3,43          | 1,71-3,43          | 1,71-3,43          | 1,71-3,43          | 1,71-3,43          | 1,71-3,43          | 1,71-3,43         | 1,71-3,43          |
| Reposición membranas  | 2,57-5,14          | 2,49-4,98          | 2,41-4,82          | 2,33-4,65          | 2,25-4,49          | 2,16-4,33          | 2,08-4,17         | 2,00-4,00          |
| Reposición cartuchos  | 0,30-0,60          | 0,30-0,60          | 0,30-0,60          | 0,30-0,60          | 0,30-0,60          | 0,30-0,60          | 0,30-0,60         | 0,30-0,60          |
| Reactivos químicos  | 2,40-4,81          | 2,32-4,63          | 2,23-4,47          | 2,15-4,29          | 2,06-4,12          | 1,98-3,95          | 1,89-3,78         | 1,80-3,61          |
| Energía eléctrica <sup>2</sup>  | 17,60              | 17,60              | 17,60              | 17,60              | 17,60              | 17,60              | 17,60             | 17,60              |
| Total costes de operación   | 39,24-46,24        | 31,75-38,57        | 27,92-34,59        | 26,55-33,03        | 25,72-32,04        | 25,19-31,35        | 24,78-30,78       | 24,43-30,26        |
| <b>COSTE TOTAL DEL M<sup>3</sup></b>  | <b>55,76-62,76</b> | <b>48,27-55,09</b> | <b>44,44-51,11</b> | <b>43,07-49,55</b> | <b>42,24-48,56</b> | <b>41,71-47,87</b> | <b>41,3-47,30</b> | <b>40,95-46,78</b> |

Tabla 12. Coste total del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada (c€/m<sup>3</sup>). [50]

En la tabla anterior, los valores presentados tienen en cuenta de que no existe subvenciones que afecten a la amortización y que se ha supuesto un consumo de 4,4 kWh/m<sup>3</sup> con un coste de 4 c€/kWh.

En el año 2004, en el IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua, Manuel Latorre presenta un artículo denominado “Costes económicos y medioambientales de la desalinización de agua de mar”. En este artículo se comentaba que los costes de inversión se habían reducido bastante como consecuencia del abaratamiento de las membranas, estando en ese año 2004 rondando los 600 €/m<sup>3</sup> de inversión. Asimismo, se comenta que los costes de explotación y operación habían evolucionado a la baja como consecuencia de la variación del consumo energético, llegando a valores de 3,4 kWh/m<sup>3</sup> para el proceso de ósmosis inversa. También se refleja en dicho documento la variación del consumo energético en las plantas desalinizadoras. Por último, nos refleja que en el año 2001, en España el coste del agua de mar desalinizada estaba cercano a 0,48 €/m<sup>3</sup>. Es importante hacer notar que dicho artículo no habla en momento alguno de la tecnología empleada para dicha desalinización. Adjuntamos las dos tablas 13 y 14 con dichos valores. [83]

| Año  | Tecnología | kWh/m <sup>3</sup> |
|------|------------|--------------------|
| 1970 | MSF        | 22                 |
| 1980 | MSF        | 18                 |
| 1985 | VC         | 15                 |
| 1988 | VC         | 13                 |
| 1990 | OI         | 8,5                |
| 1994 | OI         | 6,2                |
| 1996 | OI         | 5,3                |
| 1998 | OI         | 4,8                |
| 1999 | OI         | 4,5                |
| 2000 | OI         | 4,0                |
| 2001 | OI         | 3,7                |
| 2002 | OI         | 3,5                |
| 2004 | OI         | 3,4                |

Tabla 13. Variación del consumo energético en plantas desalinizadoras. [83]

| Año  | €/m <sup>3</sup> | \$/m <sup>3</sup> |
|------|------------------|-------------------|
| 1970 | 2,1              | 2,33              |
| 1980 | 1,81             | 2,01              |
| 1985 | 1,11             | 1,23              |
| 1990 | 0,96             | 1,07              |
| 1992 | 0,87             | 0,96              |
| 1994 | 0,75             | 0,83              |
| 1996 | 0,66             | 0,73              |
| 1998 | 0,58             | 0,64              |
| 2000 | 0,52             | 0,58              |
| 2001 | 0,48             | 0,53              |

Tabla 14. Variación de los costes totales del agua de mar desalinizada en España. [83]

En el año 2004, la revista Medio Ambiente, perteneciente a la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, presenta un artículo de César Vega, que pertenece al Instituto del Agua de Andalucía, titulado "Pequeñas desalinizadoras". Si bien dicho artículo está relacionado con aguas salobres y subterráneas, si se empieza a comentar, que es lo novedoso de este artículo, que empieza a tener en cuenta el sistema de telecontrol, de manera que se regula el funcionamiento de la planta sin la necesidad de tener técnicos especializados. [84]

En el año 2004, la revista AIChE Journal, en su volumen 46, publica un artículo de Fazilet Mascan, Dianne E. Wiley, Lloyd P.M. Johnston y David J. Clements en la cual se comenta la estructura de los módulos de ósmosis inversa, su configuración y las condiciones de operación para optimizar el agua desalinizada. En el mismo se hace un pequeño estudio del modelo tipo de modulo de membrana y la configuración del módulo optimizando el proceso. Asimismo, se dan algunos valores muy básicos sobre el coste de electricidad, de permeado y de membrana. [85-96]

En el año 2004, en la revista Ambienta del mes de octubre, Miguel Torres Corral presenta en su artículo “Avances técnicos en la desalinización de aguas” una serie de conclusiones que comentamos a continuación. Primeramente comenta que la ósmosis inversa ha desplazado completamente en España a los procesos de evaporación por su menor coste de inversión y explotación. En segundo lugar, comenta por encima las cuatro grandes áreas bien definidas y diferenciadas en las que se analizan los avances técnicos a corto plazo, que son, la toma de agua de mar y pretratamiento, el sistema de alta presión y recuperación de energía, el sistema de la ósmosis inversa y el postratamiento. Por último, presenta un tabla con lo que puede ser el coste del agua desalinizada, que ponemos a continuación. [36]

| Bases de cálculo     | Unidades               | 1995    | 2002    | 2004    | 2010    |
|----------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Coste inversión      | €/m <sup>3</sup> y día | 890     | 610     | 600     | 590     |
| Amortización         | Años                   | 15      | 15      | 15      | 15      |
| Interés              | %                      | 10      | 4       | 4       | 4       |
| Consumo              | kWh/m <sup>3</sup>     | 5,3     | 4,1     | 3,6     | 2,9     |
| Precio energía       | €/kWh                  | 0,077   | 0,048   | 0,048   | 0,048   |
| Tipo de toma         |                        | abierta | abierta | abierta | abierta |
| Coste desalinización |                        |         |         |         |         |
| Energía eléctrica    | €/m <sup>3</sup>       | 0,408   | 0,196   | 0,172   | 0,139   |
| Personal             | €/m <sup>3</sup>       | 0,036   | 0,036   | 0,030   | 0,025   |
| Productos Q.         | €/m <sup>3</sup>       | 0,030   | 0,028   | 0,028   | 0,030   |
| Mantenimiento        | €/m <sup>3</sup>       | 0,024   | 0,024   | 0,024   | 0,024   |
| Membranas            | €/m <sup>3</sup>       | 0,018   | 0,018   | 0,016   | 0,014   |
|                      |                        |         |         |         |         |
| Total explotación    | €/m <sup>3</sup>       | 0,516   | 0,302   | 0,270   | 0,232   |
| Amortización         | €/m <sup>3</sup>       | 0,337   | 0,170   | 0,168   | 0,165   |
| Coste total          | €/m <sup>3</sup>       | 0,853   | 0,472   | 0,438   | 0,397   |

Tabla 15. Evaluación de costes del agua desalinizada. [36]

Como se puede observar en la tabla 15, desde el año 2004 se realizaban estimaciones y evaluaciones de costes para el año 2010. También es importante recalcar que ya se intuía que los valores se acercarían mucho hacia el 0,4 €/m<sup>3</sup> de agua desalinizada.

En el año 2005, en la revista Tecnología del Agua del mes de febrero, María Amparo Melián Navarro, José María Cámara Zapata y José Alberto García Trujillo redactan un artículo denominado “Cuantificación del coste del agua de mar desalinizada por O.I. para riego”, en el cual mediante una tabla se pone de manifiesto en función de la capacidad de la planta y los factores de coste (amortización, personal, mantenimiento, membranas, reactivos y energía) que el coste del agua desalinizada varía entre 0,6091 €/m<sup>3</sup> para plantas de pequeña capacidad y 0,3649 €/m<sup>3</sup> para plantas de gran capacidad, siempre para el caso de agua para riego. [97-102]

En el año 2005, la revista Desalination, en su número 170, publica un artículo de Dubravko Sambrailo, Jure Ivic y Ante Krstulovic donde nos realizan una evaluación económica de la primera planta desalinizadora de O.I. realizada en Croacia de agua salobre. En este artículo, comienzan a separar costes de capital dentro de los que se nombran los apartados de los equipos instalados, la obra civil y la amortización de los mismos y por otro lado, se nombran los costes de operación y mantenimiento dentro de los cuales se citan la electricidad, el personal, la reposición de membranas, los filtros y los productos químicos, llegando a obtener un valor del coste de 0,6 €/m<sup>3</sup>, siempre para agua salobre. [103-106]

En el año 2005, la revista Desalination, en su número 172, publica un artículo de Mohamed H.I. Dore en el cual se trata la previsión de los costes económicos de la desalinización. En este caso, Dore comenta el término de economía de escala para las grandes plantas y nos da un valor que oscila entre los 0,48 \$/m<sup>3</sup> y 0,42 \$/m<sup>3</sup> el coste del agua desalinizada de mar por O.I., sin entrar a separar en apartados el coste. [107-113]

En el año 2005, la revista Desalination, en su número 173, publica un artículo de Wilf M. y Bartels C., en el cual se empieza a tratar algo tan importante para el consumo energético como es la eficiencia de las bombas. Se pone de manifiesto que las eficiencias para las bombas de impulsión deben estar sobre el 88%, las turbinas Pelton y los intercambiadores deben estar sobre el 94% y los motores eléctricos rondando los valores del 96%. [114]

En el año 2005, la revista Desalination, en su número 184, publica un artículo de U. Atikol, Hikmet S. Aybar en el cual se presentan una serie de expresiones matemáticas, realmente cuatro, atendiendo a los siguientes factores que según los autores conforman el coste total del agua de mar desalinizada por O.I.. Según ellos los costes están formados por el coste del capital, la electricidad, el mantenimiento, los productos químicos, la reposición de membranas, el pretratamiento, la mano de obra y la amortización. [115]

En el año 2005, Manuel Hernández Suárez, escribe un artículo sobre la distribución de costes de una planta de 50.000 m<sup>3</sup>/día, es decir, 17.800.000 m<sup>3</sup>/año asignándole una disponibilidad del 97,5 % (356 días). La estimación que ha realizado es en base a consultas con diversas empresas en el sector de las Islas Canarias y llega a la conclusión de que el coste total de la desalinización está alrededor de 0,4357 €/m<sup>3</sup>. En dicho artículo se estructuran los costes en cuatro grandes apartados, el personal, los costes fijos donde los separa en costes de explotación, costes de mantenimiento y costes de conservación, los costes variables basados en el pretratamiento, postratamiento, membranas y cartuchos y por último el coste de la energía eléctrica. [116]

En el año 2005, la revista I.T., en su número 72, publica un artículo de Manuel Fariñas Iglesias denominado “El coste del agua producida por las grandes desalinizadoras de agua de mar en España”. El estudio está basado en una planta de 140.000 m<sup>3</sup>/día. En dicho artículo se dividen los costes en fijos y variables. En el apartado de fijos tiene en cuenta la amortización, el personal, el término de potencia, administración y varios y en el apartado de variables tiene en cuenta los productos químicos, el mantenimiento, la energía eléctrica, las membranas y cartuchos y la renovación de equipos. En el apartado final llega a la conclusión de que el coste con IVA incluido es de 0,5216 €/m<sup>3</sup>. [117]

En el año 2005, en diciembre, la revista Journal of Contemporary Water Research & Education, en su número 132, publica un artículo de Tamim Younos de los costes de la desalinización. En este artículo se comenta los costes derivados de la construcción dividiéndolos en costes directos e indirectos y también se exponen los costes de operación y mantenimiento, separándolos en costes fijos y variables. Adjuntamos la tabla 16 para observar los porcentajes que corresponde a cada coste en función de que hablemos agua de mar o agua salobre. [118]

|                                | Agua salobre (%) | Agua de mar (%) |
|--------------------------------|------------------|-----------------|
| <b>Costes fijos</b>            | 54               | 37              |
| <b>Consumo eléctrico</b>       | 11               | 44              |
| <b>Personal</b>                | 9                | 4               |
| <b>Reposición de membranas</b> | 7                | 5               |
| <b>Mantenimiento</b>           | 9                | 7               |
| <b>Reactivos químicos</b>      | 10               | 3               |

Tabla 16. Distribución de costes en %. [118]

En el año 2006, en noviembre, la empresa Acciona, presenta un artículo de Luís Castilla, en el cual presenta tres gráficas relacionadas con el coste de la desalinización a nivel general. En dicho artículo se muestran los costes totales, llegando a la conclusión de que los costes de agua desalinizada oscilan entre 0,4 y 0,8 €/m<sup>3</sup>.

En segundo lugar nos muestra la distribución de dichos costes que según él es la siguiente: energía 43 %, amortización 37 %, mano de obra 5 %, sustitución de membranas 5 %, productos químicos y consumibles 4 % y mantenimientos y otros un 6 %.

Por último, llega a la conclusión de que a finales del año 2006, el consumo de energía eléctrica estaba por debajo de los 4 kWh/m<sup>3</sup>. [20]

En el año 2007, la revista Desalination, en su número 216, publica un artículo de C. Fritzmann, J. Lowenberg, T. Wintgens y T. Melin en el cual hacen un repaso a la historia de la desalinización de agua de mar mediante diferentes tecnologías y después sobre la ósmosis inversa en concreto.

Dicho trabajo presenta la tabla 17 que adjuntamos, donde se puede observar en el año 2007 las plantas desalinizadoras que se han instalado en esa época en Europa, donde entre otras, aparecen las de Las Palmas, Telde y Lanzarote. [119]

| Localidad         | Capacidad (m <sup>3</sup> /d) | Año de construcción | Referencia |
|-------------------|-------------------------------|---------------------|------------|
| Lárnaca (Chipre)  | 56.000                        | 2001                | [120]      |
| Las Palmas        | 78.000                        | 1969-2004           | [121]      |
| Carboneras        | 123.000                       | 2002                | [122]      |
| Bahía de Palma    | 67.500                        | 2001                |            |
| Marbella          | 55.000                        | 1996                | [123]      |
| Telde             | 35.000                        | 2001                | [124]      |
| Lanzarote         | 20.000                        | 2000                | [125]      |
| Canal de Alicante | 63.000                        | 2006                | [126]      |
| Cartagena         | 140.000                       | 2006                | [127]      |

Tabla 17. Plantas desalinizadoras de O.I. instaladas recientemente en Europa. [119]

En este artículo ya se comenta lo interesante que son los sistemas de recuperación de energía e incluso se presenta una pequeña planta de 128 m<sup>2</sup> de superficie y una altura de 6 m como dimensiones básicas para una planta.

Es importantísimo dicho artículo, puesto que en él ya se comenta por encima las repercusiones medioambientales de la salmuera, se hacen algunas señas sobre el programa ROSA y se presentan determinadas características del agua de alimentación en las Islas Canarias. Por último este artículo hace mención a la energía consumida y a la distribución de los costes, (membranas, mantenimiento, personal y reactivos químicos), en una planta desalinizadora de agua de mar mediante O.I.. Podemos comentar que dicho artículo a nivel mundial será parte de nuestra frontera del conocimiento. [119]

En la fecha de abril de 2008, Gilau y Small, presentan un documento sobre el coste efectivo de la desalinización mediante la O.I. cuando se utilizan energías alternativas. Dicho artículo está basado en reseñas sobre la posibilidad de utilizar la energía eólica así como la posibilidad de utilizar un nuevo método pre calentando el agua de alimentación. [128-133]

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 220, publica un artículo de Demet Akgul, Mehmet Cakmakci, Necati Kayaalp y Ismail Koyuncu en el cual trata de analizar el coste de agua de mar desalinizada mediante O.I. en Turquía, en concreto en los mares Mediterráneo, Mármara y Negro. En este caso se estudia y se aportan gráficas de los parámetros de coste (energía, productos químicos, vida de las membranas, el flujo del permeado, la conversión, el

pretratamiento, el postratamiento y la vida de la planta) en función de la capacidad, siempre para el país de Turquía. [134,135]

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 221, publica un artículo de Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubkhanah y Jong-Mihn Wie que trata de los avances de las nuevas tecnologías en la desalinización de agua de mar. En concreto y en lo que se refiere a la ósmosis inversa comentan que dichos avances irán dirigidos hacia la mejora de las tecnologías de fabricación de membranas y la introducción de los sistemas de recuperación de energía. Para ellos el coste de la desalinización de agua de mar por O.I. se encuentra aproximadamente en los 0,53 \$/m<sup>3</sup>. [136]

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 223, publica un artículo de Ioannis C. Karagiannis y Petros G. Soldatos en el cual se estudia los valores del coste de producción de agua de mar desalinizada mediante O.I. y demás tecnologías. Los valores que apuntan son en torno a 0,36 y 0,53 €/m<sup>3</sup> para grandes desalinizadoras, (100.000-320.000 m<sup>3</sup>/día) y valores de 1,20 €/m<sup>3</sup> para pequeñas desalinizadoras de agua de mar, (100 m<sup>3</sup>/día), según tabla 18. [137]

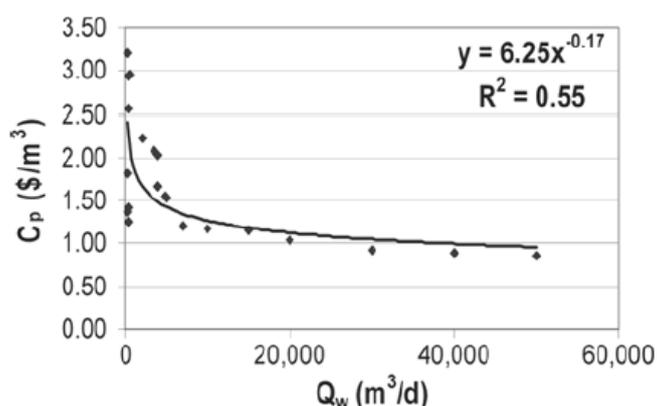
| Agua de alimentación | Producción (m <sup>3</sup> /d) | Coste/m <sup>3</sup> | Referencias         |
|----------------------|--------------------------------|----------------------|---------------------|
| <b>Agua Salobre</b>  | <20                            | 4,50€–10,32€         | [138]               |
|                      | 20–1.200                       | 0,62€–1,06€          | [103,139]           |
|                      |                                |                      |                     |
|                      | 40.000–46.000                  | 0,21€–0,43€          | [72,140]            |
| <b>Agua de Mar</b>   | <100                           | 1,20€–15,00€         | [138,141]           |
|                      | 250–1.000                      | 1,00€–3,14€          | [72,77]             |
|                      | 1.000–4.800                    | 0,56€–1,38€          | [72,77,115,142,143] |
|                      |                                |                      |                     |
|                      | 15.000–60.000                  | 0,38€–1,30€          | [72,139,144]        |
|                      |                                |                      |                     |
|                      | 100.000–320.000                | 0,36€–0,53€          | [145]               |

Tabla 18. Coste de desalinización para plantas de O.I. [137]

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 223, publica un artículo de Salah Frioui y Rabah Oumeddour en el cual se pone de manifiesto que el coste total del agua desalinizada está basado en la suma de los costes de capital, costes de construcción y el coste de funcionamiento. Se comenta una serie de ítems que son fundamentales para que la planta funcione. En base a lo anterior llega a la conclusión de que el coste en  $\$/m^3$  puede llegar a 1,81  $\$/m^3$  en el caso de la tecnología de ósmosis inversa y teniendo como costes fundamentales el capital, la energía, los elementos químicos y un gran apartado que llama otros. [146].

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 225, publica un artículo de A. Lamei, P. Van der Zaag y E. Von Munch en el cual se presentan dos tablas de costes con gráficas y 2 expresiones matemáticas referidas todas a la estimación de costes en 21 plantas desalinizadoras de O.I. y al suministro de agua mediante tuberías a largas distancias para abastecer a las regiones costeras y áridas de Egipto. Se presentan 2 opciones que responden a los costes totales básicos sin bombear el agua producto y costes totales introduciendo el bombeo del agua producto. En dicho artículo se llega a la conclusión de que en el mejor de los casos el coste es de 0,86  $\$/m^3$ . Presentamos a continuación las gráficas y las expresiones matemáticas de estas dos opciones, según documentos. [147,148]

La gráfica 13 corresponde a los costes básicos de producción en  $\$/m^3$ .



Gráfica 13. Costes básicos para plantas de O.I. [147]

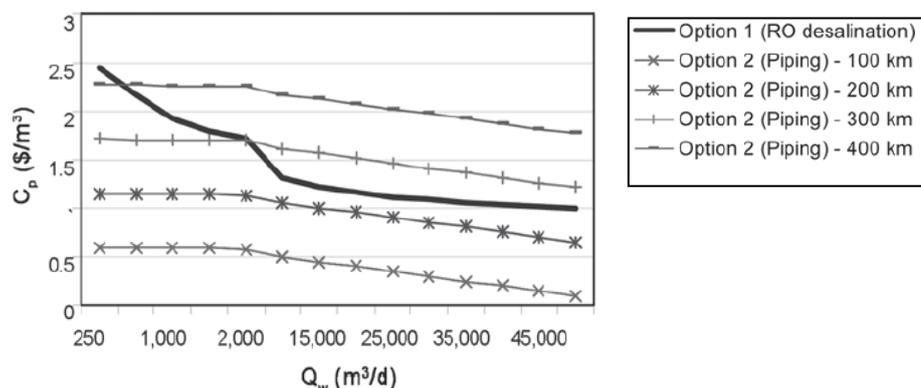
Las ecuaciones que responden a estas gráficas son:

$$C_c = 1340,9 \exp^{-2 \times 10^{-5} Q_w}$$

$$C_p = 6,25 Q_w^{-0.17}$$

En ellas hay que tener en cuenta que  $C_c$  es el coste básico de capital y  $C_p$  el coste básico de producción.

La gráfica 14 corresponde a los costes de producción en  $\$/m^3$  añadiendo los costes para bombear el agua a 100, 200, 300 y 400 km de distancia.



Gráfica 14. Costes de producción para distancias largas. [148]

Las ecuaciones que responden a estas gráficas son:

$$C_c = 49 + 18,5L - 0,04Q_w$$

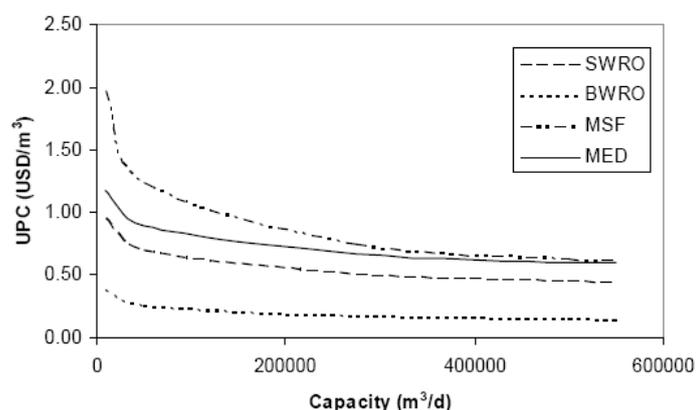
$$C_p = 0,04 + 0,01L - 10^{-5}Q_w$$

Al igual que antes hay que tener en cuenta que  $C_c$  es el coste básico de capital y  $C_p$  el coste básico de producción.

En el año 2008, la revista Desalination, en su número 229, publica un artículo de Michelle K. Wittholz, Brian K. O’Nelly, Chris B. Colby y David Lewis. En el artículo, los autores hacen una estimación de los costes de agua producida por desalinización, para 4 tipos de tecnología diferentes con cuatro capacidades de producción de la planta, según gráfica 15. También en dicho artículo se estudia el caso específico de la ciudad de Adelaide que pertenece al sur de Australia. Los autores llegan también en este artículo a la conclusión de que la producción de agua de mar mediante O.I. podría llegar a al rango de 0,45  $\$/m^3$ , según se observa en la tabla 19. [149-153]

| Capacidad (m³/día) | Coste del capital ( $\$ \cdot 10^6$ ) | Coste unitario del agua ( $\$/m^3$ ) |
|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 10.000             | 20,1                                  | 0,95                                 |
| 50.000             | 70,0                                  | 0,70                                 |
| 275.000            | 293,0                                 | 0,50                                 |
| 500.000            | 476,7                                 | 0,45                                 |

Tabla 19. Costes para diferentes producciones. [149]



Gráfica 15. Estimación de costes según la tecnología. [149]

En el año 2009, la revista *Desalination*, en su número 245, publica un artículo realizado por Catherine Charcosset basado en una revisión de las membranas de los procesos de desalinización utilizando energías renovables. En dicho artículo se dedica un párrafo a hablar de cada uno de los procesos de desalinización y se comenta que en particular la ósmosis inversa es uno de los métodos más eficientes requiriendo entre 3 y 10 kWh/m³ de energía eléctrica para la producción de agua potable a partir de agua de mar. También comenta que la desalinización por ósmosis inversa tiene un factor de conversión que oscila entre el 25 y el 45 %. [154]

En el año 2011, la revista *Desalination and Water Treatment*, en su número 26, publica un artículo de Rabia Seda Timura, Göksel Demirb, Asli Çobanb, Adnan Çorumc y Tunç Bozburac. En él, se comenta de una manera generalizada una serie de costes para una planta con una producción de 100 m³/día y un factor de conversión del 35%. Los autores presentan 2 casos basados en si la planta desalinizadora tiene o no un sistema de recuperación de energía. Para el primer caso el coste correspondiente al consumo energético es de 0,437 €/m³, mientras que para el segundo el coste es de 0,9493 €/m³. También se presenta el coste del consumo de reactivos con un valor de 0,11608 €/m³. Por último comentar que en dicho artículo se presentan determinados porcentajes correspondientes al resto de costes, sin nombrar en momento alguno el cote de reposición de filtros de cartuchos y el coste medioambiental. [155]

También en el año 2011, la revista *Desalination and Water Treatment*, en su número 36, publica un artículo de Veera Gnaneswar Gude relacionado con el consumo de energía y la recuperación de la misma. En dicha publicación se pone de manifiesto que el consumo sólo del

proceso de la ósmosis inversa presenta un valor de 2,8 kWh/m<sup>3</sup> para una planta desalinizadora ubicada en Los Angeles, California. [156]

Una vez que hemos revisado cronológicamente los escritos, artículos y publicaciones realizadas y referidas a la O.I. y al coste real del m<sup>3</sup> de agua de mar desalinizada hay que hacer notar que el progreso de la maquinaria, tanto de membranas como bombas y equipos eléctricos ha sido espectacular en muy poco tiempo. Los fabricantes mejoran sus productos, los avances tecnológicos mejoran los procesos, las plantas mejoran los rendimientos y los diseños de los ingenieros encargados de proyectar y realizar las plantas hacen que el estudio económico sea una realidad en los días en los que nos encontramos.

Inicialmente, parece que tenemos una serie de elementos o costes que pueden ser fijos o variables en la construcción de plantas desalinizadoras, tanto la obra civil, como la amortización de la inversión, el personal, el mantenimiento, los filtros, las bombas de alta presión, las membranas, equipos de control.... etc.

Como componentes básicos de una planta desalinizadora de O.I. no podemos prescindir de ellos aunque sea en una pequeña parte, por lo que a la hora de realizar una planta desalinizadora de este tipo hay que afinar muy bien los costes para que con el paso del tiempo dicha planta sea rentable económicamente.

A lo largo del tiempo que hemos dedicado al estado el arte, revisando numerosos libros, publicaciones, revistas del sector, páginas webs, charlas con los responsables de las plantas, T.D., tesinas y demás documentación que se nos ha aportado o que se ha encontrado a través de la biblioteca digital observamos que el estudio del coste real del m<sup>3</sup> de agua desalinizada no está completamente investigado, existiendo algunas incógnitas en determinados casos y en el mejor de los mismos se aportan determinados márgenes amplios y variables que nos indican que en este campo falta bastante por hacer, estudiar e investigar.

Como hemos podido analizar, los estudios realizados hasta ahora se orientan a grandes plantas desalinizadoras, motivo por el cual hemos realizado dicha T.D.. En la misma hemos estudiado e iniciado nuestra actividad investigadora en un rango que oscila entre los 500 y 15.000 m<sup>3</sup>/día como consecuencia de ser el rango en el cual se encuentran más del 90% de las plantas desalinizadoras de O.I. en las Islas Canarias. Es importante comentar que la tendencia en las Islas Canarias sobre la construcción de plantas desalinizadoras de pequeño tamaño viene orientado por la cantidad de barrancos existentes, que hacen que existan gran cantidad de pequeños núcleos urbanos alejados entre ellos.

Una vez que iniciamos la T.D. con la idea definitiva, como consecuencia de que el tiempo transcurre rápidamente y la misma no se realiza en un corto espacio de tiempo, tenemos

que ir revisando cada cuatro meses nuestra bibliografía para no incurrir en el error de que paralelamente a nuestro trabajo de investigación se esté generando otra T.D. o algún estudio paralelo o de idea similar al nuestro.

Está claro inicialmente que a nuestro favor corre que las Islas Canarias son pioneras en este tipo de desalinización de agua por lo que eso implica que la información la tengamos al día.

Por otro lado, hemos estado en contacto a nivel nacional con diferentes personas que están vinculadas con la desalinización de agua, lo que implica que nos han tenido al día dentro de un margen razonable.

A través de la biblioteca digital obtenemos la información de las T.D. que se van presentando a lo largo de este tiempo.

Por último, decir que justo tres meses antes de presentar nuestro trabajo hemos vuelto a revisar la totalidad de la documentación y la bibliografía.

## 5.4 Frontera del conocimiento

Una vez que hemos llegado a este punto de la T.D., es el momento de explicar y comentar hasta donde han llegado los estudios realizados con anterioridad y qué es lo que se pretende con dicha T.D..

a) Por un lado podemos comentar que los valores de los costes presentados hasta este momento son en grandes plantas desalinizadoras, en prototipos realizados en Universidades y datos procedentes de investigaciones de inicios de la década del 2000 y anteriores.

b) Por otro lado, los costes se han dividido como dijimos antes en determinados grandes grupos sin entrar en la subdivisión y en la diversidad interior que puede haber en alguno de ellos.

c) También queremos resaltar que no se han presentado optimizaciones de costes alguno relacionado con los factores que afectan al impacto medioambiental de las plantas desalinizadoras.

d) No se ha podido encontrar para la totalidad de los costes, tablas y graficas relacionadas con las expresiones matemáticas que calculan cada uno de los diferentes tipos de costes, aunque nos consta que pueden existir, dentro del rango investigado, es decir, entre los 500 y los 15.000 m<sup>3</sup>/día.

e) Por último, no existe estudio alguno actualizado que esté relacionado con la optimización y diversidad de las líneas de producción diferentes, su economía de escala y las

plantas desalinizadoras modulares de O.I. en el rango de 500 a 15.000 m<sup>3</sup>/día relacionadas con las últimas tecnologías. Intentamos averiguar el coste del m<sup>3</sup> de agua desalinizada de mar mediante O.I..

Basándonos en los cinco puntos anteriores observamos que existe un vacío intelectual que nosotros mediante esta T.D. pretendemos complementar.

Existen numerosos artículos publicados con producciones mayores a partir de los 20.000 m<sup>3</sup>/día.

Para producciones menores dentro del rango que nosotros queremos investigar, de 500 hasta 15.000 m<sup>3</sup>/día, el número de los artículos publicados es escaso.

Entendemos que los temas comentados en este apartado no han sido estudiados con anterioridad y por tanto nos adentramos con el estudio, análisis, resultados y sugerencias de los mismos.

Nuestra frontera del conocimiento, por tanto, está clara, en función de lo comentado con anterioridad y en función de la totalidad de la bibliografía estudiada exhaustivamente.

# CAPITULO 6

## Objetivos Definitivos



## Capítulo 6. Objetivos Definitivos

### 6.1 Introducción

En el apartado anterior, hemos definido hasta donde se ha llegado y hacia donde vamos a ir con esta T.D.. Para poder marcar los objetivos definitivos, nos hemos recorrido una parte importante de la totalidad de las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante O.I. de las Islas Canarias, lo que nos lleva a indicar que los datos que se adjuntan en esta T.D. son datos fruto de nuestra investigación realizada, investigación apoyada en los documentos de la bibliografía y fruto también de la investigación adquirida en la experiencia de campo en plantas desalinizadoras de ósmosis inversa en funcionamiento.

Con dichos datos tenemos la información adecuada para estudiar la totalidad de los costes y poder estudiar los factores económicos que afectan al diseño de las plantas.

Con todo esto nos marcamos los objetivos definitivos que se comentan en el apartado siguiente.

### 6.2 Objetivos definitivos

El objetivo definitivo y fundamental de este trabajo de investigación es optimizar los costes en las plantas desalinizadoras de agua de mar mediante la tecnología de la O.I. en las Islas Canarias.

Dicho objetivo se ha centrado en un rango de producción enmarcado desde los 500 hasta los 15.000 m<sup>3</sup>/día. El rango de producción definido obedece a que en el mismo se encuentran la mayor parte de las plantas desalinizadoras en las Islas Canarias, motivo por el cual, el trabajo de investigación aquí presentado es de interés general para nuestro archipiélago.

Como consecuencia de lo anterior, los objetivos marcados en esta T.D. son los siguientes:

- Estudio, optimización y presentación de la totalidad de las curvas correspondiente a cada uno de los costes en c€/m<sup>3</sup>, con datos procedentes de la investigación, analizando los resultados dentro del rango especificado.

- Estudio, optimización y presentación de la relación total de los factores (expresión dimensional correspondiente al modelo matemático), que afectan al coste del agua desalinizada, valores y porcentajes dentro de cada uno de los apartados generales de cada coste.
- Estudio y presentación de los factores que afectan al coste del m<sup>3</sup> de agua desalinizada relacionados con el diseño de la planta.
- Estudio, optimización y presentación de la línea de producción mas económica atendiendo al desarrollo inminente de las plantas desalinizadoras modulares.
- Presentación de la totalidad de los datos y requerimientos necesarios para obtener el coste del agua desalinizada por O.I., en cualquier lugar de las Islas Canarias.
- Por último, estudio optimización y presentación del coste real del m<sup>3</sup> de agua desalinizada de mar mediante O.I. en las Islas Canarias dentro del rango investigado.