



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

Proyecto Fin de Carrera: Análisis comparativo de permeadores en plantas de desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa : Recomendaciones sobre selección de diseños

Alumna: Mari Cruz González Pérez  
Tutora: Dra. Lourdes García Rodríguez



## ÍNDICE DE MATERIAS

<b>ÍNDICE DE MATERIAS.....</b>	<b>13</b>
<b>1.0 OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 METODOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
<b>1.2 REFERENCIAS.....</b>	<b>19</b>



## 1.0 OBJETIVOS

En España existen unas 700 plantas desaladoras de agua de mar repartidas por el litoral y las islas, siendo el quinto país en cantidad de plantas en funcionamiento; en los últimos años, además, se están creando nuevas plantas y llevando a cabo actuaciones en las ya existentes con una inversión total de casi 5000 millones de euros. La mayoría de estas plantas utilizan la tecnología de ósmosis inversa, fundamentalmente por sus menores costes de operación y mantenimiento, y el menor consumo energético con respecto a las demás tecnologías usadas: la evaporación y la electrodiálisis. De manera que la motivación de este proyecto nace de la necesidad de optimizar las plantas con el fin tener menores consumos por unidad de producto y menores costes unitarios.

Nos planteamos llevar a cabo esta necesidad de optimizar las plantas, en actuaciones en el permeador. Los permeadores de las plantas de ósmosis inversa, están compuestos por 6 ó 7 membranas, y nos preguntamos qué ocurriría si ampliamos hasta 8 y 9 elementos. Para ello crearemos un código que simule el comportamiento del permeador y proporcione la producción total, la calidad del agua, los consumos energéticos por unidad de producto y los costes unitarios para permeadores compuestos por hasta 9 elementos. Compararemos y analizaremos estos resultados para varios diseños de permeadores y sacaremos conclusiones acerca del número más adecuado de membranas en el permeador y de los mejores diseños que nos sirvan para dar recomendaciones que optimicen el diseño del permeador de las plantas desaladoras de ósmosis inversa.

## 1.1 METODOLOGÍA

A grosso modo se puede decir que el proceso de realización del proyecto se divide en dos partes bien diferenciadas; la primera de ellas es la obtención de la permeabilidad de las membranas, parámetro que no proporcionan las casas de membranas; la segunda parte es la realización de un código que simule el comportamiento del permeador, y proporcione el permeado total y la calidad del agua desalada, entre otros parámetros.

El software que se ha utilizado durante todo el Proyecto para escribir el código que simula a las membranas ha sido Mathcad 14.

Para alcanzar los dos propósitos mencionados previamente, se han completado una serie de etapas, de forma que se ha ido esbozando el comportamiento de una sola membrana hasta poder tener una buena representación de lo que se sucede en su interior y posteriormente analizar el aumento hasta ocho y nueve membranas en el permeador y analizarlo.

La primera etapa comenzó haciendo una buena lectura de las ecuaciones fundamentales del proceso de Ósmosis Inversa, en la que se consultaron varios autores y se pudo comprobar que las ecuaciones que utilizaban cada uno de ellos diferían entre ellas; esto se debe a que no existe una teoría única aceptada que proponga un modelo para describir el mecanismo de transporte en las membranas.

El primer documento que se leyó fue el Capítulo 3 de la Tesis de Vicente Romero: Caracterización y Tecnología de la desalación por Ósmosis Inversa [5]. A esta lectura le siguió el Capítulo 5 de la Tesis de Agustín Delgado: Dimensionado del sistema de desalación por Ósmosis Inversa [2], y el capítulo 6 del libro de José Miguel Veza: Introducción a la Desalación de Aguas [6]. Por último se leyeron el Capítulo 4 del libro Desalación de aguas. Aspectos tecnológicos, medioambientales, jurídicos y económicos, del Instituto Euromediterráneo [3], y el Capítulo 2: Introduction to reverse osmosis: basic terms del libro The Guidebook to Membrane Desalination Technology [7].

Tras esto la idea era tomar las ecuaciones necesarias para que se pudiese simular el comportamiento de una sola membrana y así poder posteriormente simular varias de ellas.

Para dicha simulación se trabajó sobre las ecuaciones del Capítulo 3 de la Tesis de Vicente Romero [5], en las cuales aparecen una serie de propiedades termodinámicas, tales como la molalidad y la presión osmótica que eran necesarias programar previamente, ya que se necesitarían en el modelado de la membrana. Estas propiedades, ya en código, han sido tomadas de la Tesis de Baltasar Peñate: Hybrid reverse osmosis membrane interstage design: thermo-economic analysis [4].

Además, para esta simulación de las membranas y el permeador se necesita un parámetro clave, que es la permeabilidad de la membrana, pero las casas proporcionan datos escasos que no sirven para poder obtener el modelo, y no facilitan en sus catálogos este parámetro, así que la solución a esto fue proceder a su cálculo.

Para ello, era necesario, a través de la ecuación que proporciona el caudal de permeado de una membrana semipermeable real, conocer el caudal de permeado, la presión del caudal alimentación-rechazo, la presión del permeado, y las presiones osmóticas del caudal alimentación-rechazo y del caudal de permeado de una determinada membrana y con unas determinadas condiciones de presión, temperatura y concentración del caudal de alimentación. Estos datos fueron tomados de la Tesis de Baltasar Peñate [4].

En dicho documento se encuentran varios permeadores montados con siete membranas de distintos modelos, pero cada una perteneciente a la misma marca, esto es así porque las uniones entre membranas no están estandarizadas, de manera que sólo se acoplan membranas que sean de la misma casa.

También se necesitó, en la ecuación del cálculo del caudal de permeado, el área de la membrana, dato que se tomó de los catálogos de las casas de membranas.

Baltasar Peñate, en su Tesis [4] había manejado los softwares de varias casas y había obtenido unos resultados que caracterizaban el caudal de permeado y de rechazo que se obtendría para cada una de las siete membranas de cada permeador y unas determinadas condiciones de entrada del caudal de alimentación. De esta forma con dichos resultados y los datos de entrada se tenía una ecuación en el que la incógnita era la permeabilidad, y mediante una simple ecuación se obtenía dicho parámetro.

El siguiente paso fue ampliar hasta el conocimiento de las permeabilidades de las siete membranas del permeador usado en la Tesis de Baltasar Peñate [4]. Conviene tener en cuenta que la permeabilidad es un parámetro que es función de las condiciones de operación: temperatura, presión y tiempo de operación y de las características de la membrana: espesor, material y estructura. Para el cálculo de las siete permeabilidades de las membranas se montó un sistema matricial, en el que la incógnita era un vector permeabilidad.

La segunda parte del Proyecto como se ha mencionado en la introducción era la elaboración de un programa a través de las ecuaciones de Vicente Romero [5], que permita dadas una temperatura, presión, caudal y concentración del flujo de alimentación de la membrana obtener el caudal de permeado, y el caudal de rechazo y la presión, temperatura y concentración de ambos caudales, así como la conversión de cada uno de las membranas, para un permeador formado por ocho y nueve membranas. Como inicialmente no se tienen datos del permeado y concentrado, y la ecuación del producto las precisa, se ha hecho una aproximación, y con los resultados obtenidos se iteran; se introducen de nuevo en las ecuaciones, ya sin aproximación y se obtienen los resultados.

Los datos acerca del rechazo que el programa suministra, los utiliza como condiciones de entrada del caudal de alimentación de la membrana siguiente. Este proceso se repite hasta la octava y novena membrana, y finalmente el programa proporciona el caudal de permeado total, sus condiciones de presión, temperatura y concentración y la conversión total del sistema.

Este proceso se repite para cada uno de los diseños con los que Baltasar Peñate trabaja en su Tesis [4]. Además, se incluyen en el código un apartado económico en el que se analiza para cada diseño el coste total de las membranas, el coste de equipos auxiliares y el coste total asociado al consumo de la bomba de alta presión, en el cual se ha tenido en cuenta un recuperador energético con un rendimiento de un 96%. Para este último coste se ha tenido en cuenta el coste energético y el de la potencia. Ambos términos se han tomado del BOE Anexo 1 del Real Decreto RD 1436/2002 del 27 de diciembre [1].

Con la información obtenida, analizaremos el comportamiento del permeador a medida que se introduce un elemento más, y compararemos los distintos diseños. Finalmente sacaremos conclusiones para optimizar el permeador teniendo en cuenta los costes por unidad de producto.

## 1.2 REFERENCIAS

1. BOE, Anexo 1 del Real Decreto RD 1436/2002 del 27 de diciembre.
2. A. M. Delgado Torres, Diseño preliminar de un sistema de desalación por ósmosis inversa mediante energía solar térmica, Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2006.
3. Instituto Euromediterráneo del agua, Desalación de aguas. Aspectos tecnológicos, medioambientales, jurídicos y económicos, Fundación Instituto Euromediterráneo del Agua, España, 2009.
4. B. Peñate, Hybrid reverse osmosis membrane interstage design: thermo-economic analysis, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2010.
5. V. Romero-Ternero, Análisis termoeconómico de la desalación de agua de mar mediante ósmosis inversa con aplicación de energía eólica, Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 2003.

6. J. M. Veza, Introducción a la Desalación de aguas, Las Palmas de Gran Canaria: Servicio de Publicaciones de la ULPGC, España, 2002.

7. M. Wilf, L. Awerbuch, C. Bartels, M. Mickley, G. Pearce, N. Voutchkov, The Guidebook to Membrane Desalination Technology, Balaban Desalination Publications, Reino Unido, 2007.