



CAPÍTULO 4

MODELADO DE UN PERMEADOR

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

ÍNDICE DE MATERIAS.....	75
GLOSARIO DE SÍMBOLOS.....	77
4.0 PRESENTACIÓN.....	83
4.1 ECUACIONES.....	83
4.2 CÁLCULO DE LAS PERMEABILIDADES.....	88
4.3 PROGRAMACIÓN DEL PERMEADOR.....	94
4.4 REFERENCIAS.....	103

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

A: Área de la membrana (m^2)

c_{FR} : Concentración media de alimentación-rechazo (kg/m^3)

c_R : Concentración de rechazo (kg/m^3)

c_F : Concentración de alimentación (kg/m^3)

$c_{F,0}$: Concentración de alimentación en condiciones de referencia

c_D : Concentración de agua producto (kg/m^3)

$c_{FR,0}$: Concentración media de alimentación-rechazo en condiciones de referencia

Δc : Concentración neta diferencial o diferencia de concentración entre el caudal de alimentación-rechazo y el caudal de agua producto (kg/m^3)

f_R : Factor de conversión, adimensional

f_{SR} : Factor de rechazo de sales, adimensional

f_{SP} : Factor de paso de sales, adimensional

f_{CT} : Factor de corrección de la permeabilidad de referencia por temperatura, adimensional

f_{Ct} : Factor de corrección de la permeabilidad inicial por tiempo de operación, adimensional

f_{CP} : Factor de corrección del caudal de agua por aplicación de una presión distinta del valor de referencia, adimensional

f_{CSP} : Factor de corrección del paso de sales respecto al valor de referencia, adimensional

K_D : Coeficiente de transporte o constante característica del paso de agua a través de la membrana (caudal de agua por unidad de presión neta diferencial, $m^3/(s \cdot kPa)$)

K_S : Coeficiente de transporte o constante característica del paso de sales a través de la membrana (caudal de sales por unidad de concentración neta diferencial, m^3/s)

L_D : Permeabilidad hidráulica de la membrana (caudal de agua por unidad de área y unidad de presión neta diferencial, $m/(s \cdot kPa)$)

$L_{D,0}$: Permeabilidad inicial en condiciones de referencia

L_S : Permeabilidad de las sales (caudal de sales por unidad de área y unidad de concentración neta diferencial, m/s).

P_F : Presión externa de alimentación de alta presión (kPa)

P_R : Presión externa de rechazo de alta presión (kPa)

P_{FR} : Presión externa media de alimentación-rechazo de alta presión (media aritmética de P_F y P_R)

P_D : Presión de descarga de agua desalada (kPa)

ΔP : Presión externa diferencial o presión externa interfacial media aplicada a la membrana (kPa)

ΔP : Presión neta diferencial o presión neta interfacial media, resultado de restar a la presión externa diferencial aplicada la presión osmótica diferencial (kPa)

q_D : Caudal de agua desalada (m^3/s , usualmente $m^3/día$)

q_F : Caudal de alimentación (m^3/s , usualmente $m^3/día$)

q_S : Caudal de sales (kg/s)

R: Conversión (%)

SP: Paso de sales (%)

- Q_f : Caudal de alimentación (m^3/h)
- Q_d : Caudal de permeado (m^3/h)
- P_F : Presión del caudal de alimentación de cada membrana (bar)
- P_R : Presión del caudal de rechazo de cada membrana (bar)
- P_D : Presión del caudal de permeado de cada membrana (bar)
- T_F : Temperatura del caudal de alimentación de cada membrana ($^{\circ}C$)
- T_R : Temperatura del caudal de rechazo de cada membrana ($^{\circ}C$)
- T_D : Temperatura del caudal de permeado de cada membrana ($^{\circ}C$)
- ppm_F : Concentración del caudal de alimentación de cada membrana (ppm)
- ppm_R : Concentración del caudal de rechazo de cada membrana (ppm)
- ppm_D : Concentración del caudal de permeado de cada membrana (ppm)
- P_{FR_i} : Presión de alimentación-rechazo de cada membrana (bar)
- Ppm_{FR_i} : Concentración de alimentación-rechazo de cada membrana (bar)
- b_{F_i} : Molalidad del caudal de alimentación (moles de sal marina/ kg de solvente en la alimentación) de cada membrana
- b_{FR_i} : Molalidad del caudal de alimentación-rechazo (moles de sal marina/ kg de solvente de alimentación-rechazo) de cada membrana
- b_{R_i} : Molalidad del caudal de rechazo (moles de sal marina/ kg de solvente de rechazo) de cada membrana
- b_{D_i} : Molalidad del caudal de permeado (moles de sal marina/ kg de solvente de permeado) de cada membrana
- π_{F_i} : Presión osmótica del caudal de alimentación (kPa)
- π_{FR_i} : Presión osmótica del caudal de alimentación-rechazo (kPa) de cada membrana
- π_{D_i} : Presión osmótica del caudal de permeado (kPa) de cada membrana
- L_{D_i} : Permeabilidad de cada membrana calculada ($m/ (s \cdot kPa)$)

L_{Sj} : Permeabilidad de las sales de cada membrana calculada (m/ s)

Q_{Fj} : Caudal de alimentación (m^3/h) de cada membrana

C_{fj} : Concentración de alimentación (ppm) de cada membrana

q_{Dj} : Caudal de permeado (m^3/s) de cada membrana

P_{FRj} : Presión de alimentación-rechazo (kPa) de la membrana j

$b_{(C_{fj})}$: Función molalidad de la alimentación de la membrana j (moles de sal marina/ kg de solvente de rechazo)

$\pi(T_F, b_{(C_{fj})})$: Función presión osmótica del caudal de alimentación (kPa) de la membrana j

Q_{Dj} : Caudal de permeado (m^3/h) de cada membrana

R_j : Conversión (tanto por uno) de cada membrana

q_{Sj} : Caudal de sales (kg/s) de cada membrana

C_{pj} : Concentración del permeado (ppm) de cada membrana

C_{cj} : Concentración del rechazo (ppm) de cada membrana

ppm_{frj} : Concentración alimentación-rechazo (ppm) de cada membrana

M_{Rj} : Flujo másico del rechazo (kg/s) de cada membrana

$\rho(T_F, b_{(C_{fj})})$: Función densidad del caudal de alimentación (kg/m^3) de la membrana j

$\rho(T_D, b_{(C_{pj})})$: Función densidad del caudal de permeado (kg/m^3) de la membrana j

Q_{Rj} : Caudal de rechazo (m^3/s) de cada membrana

$\rho(T_R, b_{(ppm_{frj})})$: Función densidad del caudal de rechazo (kg/m^3) de la membrana j

q_{Dj} : Caudal de permeado (m^3/s) de cada membrana

$\pi(T_F, b_{(C_{fj})}) - C_{cj}/C_{fj}$: Función presión osmótica alimentación-rechazo (kPa) de la membrana j

$\pi(T_D, b_{(C_{pj})})$: Función presión osmótica del caudal de permeado (kPa) de la membrana j

Q_{DTj} : Permeado total (m^3/h) para cada membrana

R_j : Conversión (tanto por uno) de cada membrana

C_{pj} : Concentración del permeado (ppm) de cada membrana

C_{cj} : Concentración del rechazo (ppm) de cada membrana

M_{Rj} : Flujo másico del rechazo (kg/s) de cada membrana

$\rho(T_D, b_{(C_{pj})})$: Función densidad del caudal de permeado (kg/m^3) de la membrana j

ppm_{frj} : Concentración alimentación-rechazo (ppm) de cada membrana

Q_{Rj} : Caudal de rechazo (m^3/s) de cada membrana

$\rho(T_R, b_{(ppm_{frj})})$: Función densidad del caudal de rechazo (kg/m^3) de la membrana j

$C_{ptotalj}$: Concentración total del permeado (ppm)

rt_j : Conversión total (tanto por uno)

SP_j : Paso de sales (%) de cada membrana

P : Potencia de la bomba (W)

η_B : Rendimiento de la bomba (en tanto por uno)

$Cons_{Bj}$: Consumo de la bomba de alta presión por unidad de producto (kWh/m^3)

$Cons_{Auxj}$: Consumo de auxiliares por unidad de producto (kWh/m^3)

$Cons_{Recj}$: Consumo de la bomba con recuperador de energía por unidad de producto (kWh/m^3)

η : Rendimiento del sistema de recuperación energética (en tanto por uno)

$Cons_{Totalj}$: Consumo total por unidad de producto (kWh/m^3)

Tenergía: Término de Energía

Tpotencia: Término de Potencia

Gasto_Energía_5años; Consumo de energía (€) para 5 años

Gasto_Potencia_5años; Consumo de potencia (€) para 5 años

Costmemb_j; Coste de membranas por unidad de producto (€/m³)

Coste_membranas_euros_j; Coste de membranas (€)

Coste_Total_5años_j; Coste total para 5 años (€)

Q_DT_5años_j; Producto total en 5 años (m³)

Coste_Totalm3_5años_j; Coste total por unidad de producto para 5 años (€/m³)

4.0 PRESENTACIÓN

En este capítulo mostramos las ecuaciones y modelos utilizados durante la realización del Proyecto. Veremos también algunas ecuaciones en código que se han programado en Mathcad, con la intención de que se llegue a una mejor comprensión del proceso.

4.1 ECUACIONES

En la escritura del código del programa se han utilizado las ecuaciones que aparecen en el Capítulo 3 de las Tesis de Vicente Romero [3].

El modelo de transferencia a través de la membrana en el que están basadas las ecuaciones de Vicente Romero [3] es el de solución-difusión. Dicho modelo establece que los distintos componentes de la solución al llegar a la superficie homogénea de la membrana se disuelven y difunden a través de ella de forma autónoma, lo que se traduce en que el flujo de soluto a través de la membrana es esencialmente independiente de la presión y de la velocidad de permeación del agua. Además, se asume que la membrana, según una ley de distribución de equilibrio, actúa de forma selectiva para determinados componentes, en este caso el agua, y que el permeado total es función del gradiente de presiones y concentraciones entre los dos lados de la membrana.

Este modelo proporciona una estimación del caudal de permeado de una membrana semipermeable real, que mostramos a continuación:

$$q_D = L_D A (\Delta P - \Delta \Pi) = K_D \Delta P \quad \text{ec. 4-1}$$

Siendo:

q_D : Caudal de agua desalada (m^3/s , usualmente $m^3/día$)

A: Área de la membrana (m^2)

L_D : Permeabilidad hidráulica de la membrana (caudal de agua por unidad de área de membrana y unidad de presión neta diferencial, $m/(s \cdot kPa)$)

K_D : Coeficiente de transporte o constante característica de paso de agua de la membrana, función de la temperatura y del tiempo que la membrana lleve operando (caudal por unidad de presión neta diferencial, $m^3/(s \cdot kPa)$)

ΔP : Presión externa interfacial media o diferencia de presión externa media aplicada a cada lado de la membrana (kPa)

$\Delta \Pi$: Presión osmótica interfacial media o diferencia de presión osmótica media a cada lado de la membrana (kPa)

ΔP : Presión neta interfacial media, $\Delta P - \Delta \Pi$ (kPa)

Como se desprende de las ecuaciones, se puede comprobar que el caudal de permeado, crece linealmente con la presión neta interfacial media, que es la fuerza motora del proceso de paso de agua a través de la membrana.

La permeabilidad, es un parámetro que depende de las condiciones de operación: presión, temperatura y tiempo de operación y de las características de la membrana: material, estructura y espesor.

El flujo de agua salobre o agua marina de alimentación de la membrana, se mezcla con el flujo de rechazo que proporciona la membrana en su proceso selectivo de paso de agua a su través y de rechazo de las sales, el cual conforma un pequeño flujo con alta concentración en sales. Ese amalgama de flujos, hace que las condiciones de entrada varíen, especialmente la concentración de sales, y por tanto la presión osmótica de entrada; de manera que ambos aumentan; a este caudal, mezcla de alimentación y rechazo se le llama caudal de alimentación-rechazo.

A continuación, mostramos los términos de la ecuación 4-1 desarrollados, para una mejor comprensión:

$$q_D = L_D A [(P_{FR} - P_D) - (\Pi_{FR} - \Pi_D)] \quad \text{ec. 4-2}$$

Donde:

P_{FR} : Presión externa media de alimentación-rechazo (media aritmética de P_F y P_R)

P_D : Presión de descarga de agua desalada (próxima a la atmosférica)

Π_D : Presión osmótica de agua desalada (en primera aproximación, nula)

Π_{FR} : Presión osmótica media de alimentación-rechazo

Π_F : Presión osmótica de alimentación

La presión osmótica del permeado, se ha despreciado en los cálculos, dado que es muy pequeña.

El término de la presión osmótica media de alimentación-rechazo se desarrolla como sigue:

$$\Pi_{FR} = \Pi_F \frac{c_R}{c_{FR}} \quad \text{ec. 4-3}$$

En la que:

c_{FR} : Concentración media de alimentación-rechazo

c_R : Concentración de rechazo

La concentración media de alimentación-rechazo, se define de la siguiente forma:

$$c_{FR} = \frac{c_R - c_F}{\ln \frac{c_R}{c_F}} \quad \text{ec. 4-4}$$

Donde:

c_F : Concentración de alimentación

Algunos parámetros importantes en el diseño de las plantas, son el factor de paso de sales (fSP), que indica la efectividad en el paso de sales a través de la membrana y que es una característica importante de las características técnicas proporcionadas por los fabricantes, y el paso de sales (SP), que es el factor de paso de sales, pero en forma porcentual. Ambos, adimensionales, se definen así:

$$f_{SP} = \frac{c_D}{c_F} \quad \text{ec. 4-5}$$

$$SP = \frac{c_D}{c_F} \times 100 \quad \text{ec. 4-6}$$

Donde:

c_D : Concentración de agua producto

c_F : Concentración de alimentación

Además, existen otros dos factores muy importantes en las plantas de ósmosis inversa, adimensionales también, el factor de conversión (fR), y la conversión (R), este último en tanto por ciento. Ambos factores dan idea de la cantidad de agua producto o permeado que se produce a partir de un caudal de agua de alimentación, y repercuten sobre los aspectos económicos de la planta:

$$f_R = \frac{q_D}{q_F} \quad \text{ec. 4-7}$$

$$r = \frac{q_D}{q_F} \times 100 \quad \text{ec. 4-8}$$

Ecuaciones en las que se tiene:

q_D : Caudal de agua producto

q_F : Caudal de alimentación

Para aguas salobres la conversión está en torno al 70 -90% y para agua marina en torno al 30-50%.

La conversión afecta a la presión efectiva, a la concentración del agua producto y a la concentración del rechazo o salmuera.

Altos valores de la conversión implican altas concentraciones del rechazo, ello hace que disminuya la presión neta diferencial y que por tanto sea menor también la producción de agua producto; esto se traduce en que conversiones altas involucran mayores presiones de la bomba de alta presión, con el consiguiente aumento del gasto energético. Además, como aumenta la concentración del rechazo y la concentración alimentación-rechazo, se incrementa también el flujo de sales a través de la membrana, y por tanto de la salinidad del agua producto.

Por otra parte, cuando se trabaja con conversiones altas las sales con menor solubilidad pueden llegar a su límite de solubilidad debido a las altas concentraciones de la salmuera y pueden precipitar sobre la superficie de la membrana, fenómeno que se conoce como scaling o ensuciamiento cristalino.

El caudal de rechazo está limitado puesto que caudales muy pequeños no aseguran flujo turbulento en el permeador y ello provoca que pueda formarse una capa persistente en la superficie de la membrana que impida el paso de agua y aumente el peligro de precipitación. Este fenómeno se conoce como polarización, y es un motivo adicional por el cual se limita el valor de la conversión.

Se ha determinado el caudal de agua producto o permeado que atraviesa la membrana, pero no se ha definido el caudal de sales que pasa a su través. Hay que tener en cuenta que las membranas no son ideales, y siempre existe en el agua que atraviesa la membrana una cantidad de sales, que se cuantifica a continuación:

$$q_s = L_s A \Delta c = K_s \Delta c$$

ec. 4-9

Siendo:

q_s : Caudal de sales (kilogramos de sales por unidad de tiempo)

A: Área de la membrana (m^2)

L_s : Permeabilidad de las sales (caudal de sales por unidad de área de membrana y unidad de concentración neta diferencial).

K_s : Constante característica de la membrana y de la temperatura (caudal por unidad de concentración neta diferencial)

Δc : Concentración neta diferencial o diferencia de concentración entre alimentación-rechazo y agua producto (kilogramos de sales por unidad de volumen de disolución)

La concentración neta diferencial se muestra a continuación:

$$\Delta c = c_{FR} - c_D \quad \text{ec. 4-10}$$

El caudal de sales es independiente de la presión. Un aumento de presión aumenta la producción de agua, mientras que el flujo de sales se mantiene, ello implica una mejor calidad del producto.

4.2 CÁLCULO DE LAS PERMEABILIDADES

A continuación mostramos, a título de ejemplo, el código que se escribió en Mathcad para obtener las siete permeabilidades de un permeador del diseño 6 de Filmtec. Este permeador, estaba compuesto por siete membranas con los siguientes modelos: una membrana del modelo SW30HRLE-400i, una membrana del tipo SW30XLE-400i, y cinco membranas del modelo SW30ULE 400i.

Se desarrolló un sistema matricial de ecuaciones, en el que se dieron como entradas o datos los que mostramos a continuación, y que fueron

tomados, como se señaló en el apartado de Metodología, de la Tesis de Baltasar Peñate [2]:

Área de la membrana (m²):

$$A := \begin{pmatrix} 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \\ 37 \end{pmatrix}$$

ec. 4-11

Caudal de alimentación (m³/h):

$$Q_f := \begin{pmatrix} 8.11 \\ 7.33 \\ 6.55 \\ 5.83 \\ 5.30 \\ 4.91 \\ 4.65 \end{pmatrix}$$

ec. 4-12

Caudal de permeado (m³/h):

$$Q_d := \begin{pmatrix} 0.78 \\ 0.78 \\ 0.72 \\ 0.53 \\ 0.39 \\ 0.27 \\ 0.19 \end{pmatrix}$$

ec. 4-13

Presión del caudal de alimentación de cada membrana (bar):

$$P_F := \begin{pmatrix} 53.62 \\ 53.35 \\ 53.12 \\ 52.92 \\ 52.75 \\ 52.60 \\ 52.46 \end{pmatrix} \quad \text{ec. 4-14}$$

Presión del caudal de rechazo de cada membrana (bar):

$$P_R := \begin{pmatrix} 53.35 \\ 53.12 \\ 52.92 \\ 52.75 \\ 52.60 \\ 52.46 \\ 52.34 \end{pmatrix} \quad \text{ec. 4-15}$$

Presión del caudal de permeado de cada membrana (bar). Se ha supuesto que el permeado sale a la presión atmosférica:

$$P_D = 1 \quad \text{ec. 4-16}$$

Temperatura del caudal de alimentación de cada membrana (K). Se ha supuesto igual para todas las membranas e igual a veinte grados Celsius.

$$T_F := 20 + 273.15 \quad \text{ec. 4-17}$$

Temperatura del caudal de rechazo de cada membrana. Se ha supuesto la misma para todas las membranas e igual a la temperatura de los caudales de alimentación, veinte grados Celsius:

$$T_R := 20 + 273.15 \quad \text{ec. 4-18}$$

Temperatura del caudal de permeado de cada membrana (K). Se ha supuesto igual para todas las membranas y que el agua aumenta en un grado centígrado a su paso por la membrana:

$$T_D := 21 + 273.15$$

ec. 4-19

La concentración del caudal de alimentación de cada membrana (ppm):

$$\text{ppm}_F := \begin{pmatrix} 37125.94 \\ 41067.81 \\ 45913.98 \\ 51567.28 \\ 56721.62 \\ 61130.67 \\ 64603.65 \end{pmatrix}$$

ec. 4-20

La concentración del caudal de rechazo de cada membrana, que sería la de la alimentación de la siguiente membrana (ppm):

$$\text{ppm}_R := \begin{pmatrix} 41067.81 \\ 45913.98 \\ 51567.28 \\ 56721.62 \\ 61130.67 \\ 64603.65 \\ 67355.87 \end{pmatrix}$$

ec. 4-21

La Concentración del caudal de permeado de cada membrana (ppm):

$$\text{ppm}_D := \begin{pmatrix} 74.66 \\ 148.37 \\ 213.08 \\ 309.37 \\ 451.15 \\ 673.22 \\ 983.60 \end{pmatrix}$$

ec. 4-22

Con estos datos se fueron calculando los miembros de la ecuación del permeado de una membrana semipermeable real.

La presión de alimentación-rechazo (kPa) de cada membrana se calcula siguiendo la ecuación dada más arriba:

$$P_{FR_i} := \frac{(P_{F_i} + P_{R_i})}{2} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-23}$$

Donde i es un subíndice que representa a la membrana, y en el código se ha utilizado desde cero hasta seis.

La concentración alimentación-rechazo (ppm) se calcula también como en la ecuación de arriba:

$$ppm_{FR_i} := \frac{(ppm_{R_i} - ppm_{F_i})}{\ln\left(\frac{ppm_{R_i}}{ppm_{F_i}}\right)} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-24}$$

A continuación mostramos una función tomada también de la Tesis de Baltasar Peñate [2], y escrita ya en código en Mathcad; se trata de la molalidad (mol/kg) de cada corriente. Esta función, como puede comprobarse tiene como entradas la concentración en ppm de la corriente en cuestión.

Molalidad del caudal de alimentación (moles de sal marina/ kg de solvente en la alimentación):

$$b_{F_i} := b_{(ppm_{F_i})} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-25}$$

Molalidad del caudal de alimentación-rechazo (moles de sal marina/ kg de solvente de alimentación-rechazo):

$$b_{FR_i} := b_{(ppm_{FR_i})} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-26}$$

Molalidad del caudal de rechazo (moles de sal marina/ kg de solvente de rechazo):

$$b_{R_i} := b_{(ppm_{R_i})} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-27}$$

Molalidad del caudal de permeado (moles de sal marina/ kg de solvente de permeado):

$$b_{D_i} := b_{(ppm_{D_i})} \quad i := 0 .. 6 \quad \text{ec. 4-28}$$

A partir de la molalidad, y de la temperatura se calcula la presión osmótica, también tomada de la Tesis de Baltasar Peñate [2].

Presión osmótica del caudal de alimentación (kPa):

$$\Pi_{F_i} := \Pi(T_{F_i}, b_{F_i}) \quad i := 0 .. 6 \quad \text{ec. 4-29}$$

Presión osmótica del caudal de alimentación-rechazo (kPa):

$$\Pi_{FR_i} := \Pi_{F_i} \cdot \frac{ppm_{R_i}}{ppm_{F_i}} \quad i := 0 .. 6 \quad \text{ec. 4-30}$$

Presión osmótica del caudal permeado (kPa):

$$\Pi_{D_i} := \Pi(T_{D_i}, b_{D_i}) \quad i := 0 .. 6 \quad \text{ec. 4-31}$$

Finalmente, estas funciones introduciéndolas en la ecuación del permeado, y despejando la permeabilidad, se obtiene:

$$L_{D_i} := \frac{\frac{Q_{d_i}}{3600}}{A_i \left[(P_{FR_i} \cdot 100 - P_{D_i} \cdot 100) - (\Pi_{FR_i} - \Pi_{D_i}) \right]} \quad i := 0 .. 6 \quad \text{ec. 4-32}$$

Y que numéricamente proporciona los siguientes valores (m/ (s·kPa)):

$$L_D = \begin{pmatrix} 2.234 \times 10^{-9} \\ 2.578 \times 10^{-9} \\ 2.905 \times 10^{-9} \\ 2.703 \times 10^{-9} \\ 2.586 \times 10^{-9} \\ 2.356 \times 10^{-9} \\ 2.202 \times 10^{-9} \end{pmatrix} \quad \text{ec. 4-33}$$

También se ha calculado la permeabilidad de las sales, introduciendo también los datos anteriores:

$$L_{S_i} := \frac{\left(\frac{Q_{d_i}}{3600} \text{ ppm}_{D_i} \right)}{A_i \cdot (\text{ppm}_{FR_i} - \text{ppm}_{D_i})} \quad i := 0..6 \quad \text{ec. 4-34}$$

Y se obtienen los siguientes resultados (m/s):

$$L_S = \begin{pmatrix} 1.121 \times 10^{-8} \\ 2.007 \times 10^{-8} \\ 2.376 \times 10^{-8} \\ 2.288 \times 10^{-8} \\ 2.26 \times 10^{-8} \\ 2.195 \times 10^{-8} \\ 2.159 \times 10^{-8} \end{pmatrix} \quad \text{ec. 4-35}$$

Los datos de permeabilidad, y permeabilidad de sales que se han obtenido, son los de este tipo de membranas y para estas condiciones, de manera, que para usar otros tipos habría que volver a repetir el proceso, cambiando sólo los datos de entrada. Con estos datos obtenidos de la permeabilidad, y permeabilidad de las sales, ya estamos en condiciones de poder obtener un caudal de permeado, para cualquier combinación de condiciones de entrada.

4.3 PROGRAMACIÓN DEL PERMEADOR

En cuanto a este respecto, que es la segunda parte del proyecto, en el programa se ha escrito, para cada membrana, sus condiciones de entrada, presión, temperatura, y caudal, y a continuación las ecuaciones que nos permita calcular y caracterizar el permeado, el caudal de rechazo, y el flujo de

sales para un permeador de 7, 8 y 9 membranas. Las membranas están numeradas con los subíndices del 0 al 8. Para las 2 últimas membranas hemos utilizado las permeabilidades de la séptima puesto que las condiciones de presión y temperatura se mantienen prácticamente iguales.

Vamos a mostrar a continuación el código de la primera membrana, que se corresponde con el subíndice cero:

Lo primero es definir el caudal de alimentación y su concentración:

Caudal de alimentación en membrana 0 (m³/h):

$$Q_{F_0} := 8.11 \quad \text{ec. 4-36}$$

Concentración de Alimentación (ppm):

$$Cf_0 := 37125.9 \quad \text{ec. 4-37}$$

Tras esto se realiza una aproximación del caudal de permeado producido en la primera membrana (m³/s), ya que no se tiene información del rechazo y el producto:

$$q_{D_0} := L_{D_0} \cdot A_0 \cdot \left[\left(P_{FR_0} \cdot 100 - P_{D_0} \cdot 100 \right) - \left(\Pi(T_{F,b}(Cf_0)) \right) \right] \quad \text{ec. 4-38}$$

Donde:

$$P_{FR_i} := \frac{(P_{F_i} + P_{R_i})}{2} \quad i := 0..8 \quad \text{ec. 4-39}$$

Siendo:

P_{FR_0} : Presión de alimentación-rechazo (kPa) de la membrana 0

P_{F_0} : Presión de alimentación (kPa) de la membrana 0

P_{R_0} : Presión de rechazo (kPa) de la membrana 0

$b_{(Cf_0)}$: Función Molalidad de la alimentación de la membrana 0 (moles de sal marina/ kg de solvente de rechazo)

$\pi(T_F, b_0(C_{f0}))$: Función Presión osmótica del caudal de alimentación (kPa) de la membrana 0

En la ecuación 4-38 se ha aproximado la presión osmótica alimentación-rechazo por la presión de la alimentación y además se ha despreciado la presión osmótica del agua producto. Conviene también destacar que la presiones de alimentación son las mismas que las que aparecen en la Tesis de Baltasar Peñate [2], añadiendo la octava y la novena membrana, en las que se ha utilizado la misma pérdida de carga que la que se produce en el séptimo elemento.

Aproximación del caudal de permeado producido en la primera membrana (m^3/h):

$$Q_{D0} := q_{D0} \cdot 3600 \quad \text{ec. 4-40}$$

A continuación calculamos la conversión de la membrana:

$$R_0 := \frac{Q_{D0}}{Q_{F0}} \quad \text{ec. 4-41}$$

Y el caudal de sales que atraviesan la membrana. Aquí se ha aproximado la concentración de la alimentación-rechazo por la concentración de la alimentación, y se ha despreciado la concentración del permeado (kg/s):

$$q_{S0} := L_{S0} \cdot A_0 \cdot (C_{f0}) \quad \text{ec. 4-42}$$

Con estos datos ya se puede calcular la concentración del permeado (ppm):

$$C_{p0} := \frac{q_{S0}}{q_{D0}} \quad \text{ec. 4-43}$$

Y con ello la concentración del rechazo (ppm):

$$C_{c0} := \frac{(C_{f0} - R_0 \cdot C_{p0})}{1 - R_0} \quad \text{ec. 4-44}$$

La concentración alimentación-rechazo (ppm) se calcula de la siguiente forma:

$$\text{ppm}_{fr_0} := \frac{C_{-c_0} - C_{f_0}}{\ln\left(\frac{C_{-c_0}}{C_{f_0}}\right)} \quad \text{ec. 4-45}$$

A continuación mostramos un balance de masas, para la obtención del flujo másico del rechazo (kg/s):

$$M_{R_0} := Q_{-F_0} \cdot \rho(T_{-F, b_-(C_{f_0})}) - Q_{-D_0} \cdot \rho(T_{-D, b_-(C_{-p_0})}) \quad \text{ec. 4-46}$$

Donde:

$\rho(T_{-F, b_-(C_{f_0})})$: Función densidad del caudal de alimentación (kg/m^3) de la membrana 0

$\rho(T_{-D, b_-(C_{-p_0})})$: Función densidad del caudal de permeado (kg/m^3) de la membrana 0

Este flujo másico de rechazo nos permite calcular el caudal de rechazo (m^3/s):

$$Q_{-R_0} := \frac{M_{R_0}}{\rho(T_{-R, b_-(\text{ppm}_{fr_0})})} \quad \text{ec. 4-47}$$

Siendo:

$\rho(T_{-R, b_-(\text{ppm}_{fr_0})})$: Función densidad del caudal de rechazo (kg/m^3) de la membrana 0

Tras haber calculado todos estos parámetros con las aproximaciones realizadas antes mencionadas en el caudal de permeado, se realiza una iteración en los que la concentración de permeado y de rechazo se introducen como datos de partida para llegar a una solución que se encuentre más cerca de la realidad; el resto de ecuaciones se mantienen iguales pero teniendo en cuenta que para la iteración los parámetros tienen la misma nomenclatura que

en la aproximación, con la salvedad de que ahora llevan un segundo guión bajo. Esto es así salvo para las presiones y las temperaturas.

Ahora el caudal de agua producto está completa (m³/s):

$$q_{D_0} := L_{D_0} \cdot A_0 \cdot \left[(P_{FR_0} \cdot 100 - P_{D_0} \cdot 100) - \left(\Pi(T_{F,b_0}(C_{f_0})) \cdot \frac{C_{c_0}}{C_{f_0}} - \Pi(T_{D,b_0}(C_{p_0})) \right) \right]$$

ec. 4-48

En la que:

$\pi(T_{F,b_0}(C_{f_0})) \cdot C_{c_0}/C_{f_0}$: Función presión osmótica alimentación-rechazo (kPa) de la membrana 0

$\pi(T_{D,b_0}(C_{p_0}))$: Función presión osmótica del caudal de permeado (kPa) de la membrana 0

El mismo caudal en m³/h es:

$$Q_{D_0} := q_{D_0} \cdot 3600$$

ec. 4-49

Ahora recalculamos la conversión y las concentraciones; así la conversión en la iteración es:

$$R_{-0} := \frac{Q_{D_0}}{Q_{F_0}}$$

ec. 4-50

La nueva concentración del permeado (ppm) es:

$$C_{p_0} := \frac{q_{S_0}}{q_{D_0}}$$

ec. 4-51

Y la concentración de rechazo (ppm):

$$C_{c_0} := \frac{(C_{f_0} - R_{-0} \cdot C_{p_0})}{1 - R_{-0}}$$

ec. 4-52

Hacemos de nuevo el balance de masas de la ecuación 4-45:

$$M_{R_0} := Q_{F_0} \cdot \rho(T_{F_0}, b_0(C_{f_0})) - Q_{D_0} \cdot \rho(T_{D_0}, b_0(C_{p_0})) \quad \text{ec. 4-53}$$

Donde:

$\rho(T_{D_0}, b_0(C_{p_0}))$: Función densidad del caudal de permeado (kg/m^3) de la membrana 0 tras la iteración

La nueva concentración alimentación-rechazo (ppm):

$$\text{ppm}_{fr_0} := \frac{C_{c_0} - C_{f_0}}{\ln\left(\frac{C_{c_0}}{C_{f_0}}\right)} \quad \text{ec. 4-54}$$

Y podemos obtener el caudal de rechazo tras la iteración (m^3/h):

$$Q_{R_0} := \frac{M_{R_0}}{\rho(T_{R_0}, b_0(\text{ppm}_{fr_0}))} \quad \text{ec. 4-55}$$

Donde:

$\rho(T_{R_0}, b_0(\text{ppm}_{fr_0}))$: Función densidad del caudal de rechazo (kg/m^3) de la membrana 0 tras la iteración

Estas ecuaciones se repiten hasta la novena membrana, y tras esto se calcula el permeado total, la concentración total del permeado, la conversión total y el paso de sales para un permeador formado por 1, 2, 3 y hasta 9 membranas.

Vamos a mostrar el permeado total y la concentración total para el caso de 9 membranas.

Permeado total (m^3/h):

$$Q_{DT_9} := \sum Q_{D_0} \quad \text{ec. 4-56}$$

La Concentración total (ppm) la obtenemos mediante una media ponderada de la concentración de los caudales de producto de cada una de las membranas que conforman el permeador:

$$C_{ptotalj} := \frac{(Q_{D_0} \cdot C_{P_0} + Q_{D_1} \cdot C_{P_1} + Q_{D_2} \cdot C_{P_2} + Q_{D_3} \cdot C_{P_3} + Q_{D_4} \cdot C_{P_4} + Q_{D_5} \cdot C_{P_5} + Q_{D_6} \cdot C_{P_6} + Q_{D_7} \cdot C_{P_7} + Q_{D_8} \cdot C_{P_8})}{Q_{DT_8}}$$

ec. 4-57

La conversión total:

$$R_{tj} := \frac{Q_{DT_j}}{Q_{F_0}} \quad j := 0..8$$

ec. 4-58

Donde j es un subíndice que señala la posición la membrana en cuestión dentro del tubo permeador. Este subíndice va desde el 0 para el primer elemento hasta el 8 para la novena membrana.

Paso de sales (%):

$$SP_j := 100 \frac{C_{P_j}}{C_{F_j}} \quad j := 0..8$$

ec. 4-59

Por último entramos en el aspecto económico y se calcula el consumo de la bomba de alta presión por unidad de producto, el consumo auxiliar por unidad de producto, el consumo con recuperador energético, el coste de las membranas por unidad de producto, el coste de energía por unidad de producto, el coste de potencia por unidad de producto, y el coste total por unidad de producto teniendo en cuenta todos los costes anteriores. Este último coste se ha calculado para 5 años, puesto que este es el tiempo medio en el que se suelen reponer todas las membranas del permeador.

Para el cálculo del consumo de la bomba se necesita la potencia de esta (W), y un rendimiento que nosotros hemos supuesto de 0.75:

$$P := \frac{P_{F_0} \cdot 100000 \cdot \frac{Q_{F_0}}{3600}}{\eta_B}$$

ec. 4-60

Consumo de la bomba por unidad de producto (kWh/m³):

$$\text{Cons_B}_j := \frac{P}{1000} \cdot \frac{1}{Q_DT_j} \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-61}$$

El consumo de auxiliares por unidad de producto (kWh/m³) ha sido tomado de la Tesis de Baltasar Peñate [2], y está en función de la conversión:

$$\text{Cons_Aux}_j := \frac{0.35}{rt_j} \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-62}$$

Hemos supuesto también un sistema que recupera la energía del rechazo para este sistema, con un rendimiento de recuperación del 96%, este consumo por unidad de producto es el siguiente (kWh/m³):

$$\text{Cons_Rec}_j := \text{Cons_B}_j - \eta \cdot \frac{Q_R_j}{3600} \cdot P_R_j \cdot 100000 \frac{1}{Q_DT_j \cdot 1000} \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-63}$$

El consumo total por unidad de producto incluye el consumo de la bomba y el consumo de auxiliares (kWh/m³):

$$\text{Cons_Total}_j := (\text{Cons_Aux}_j + \text{Cons_Rec}_j) \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-64}$$

Una vez tenemos los consumos, vamos a calcular los costes asociados a la energía y a la potencia para 5 años. Para estos gastos hemos utilizado el término de potencia y el término de energía tomados del BOE Anexo 1 del Real Decreto RD 1436/2002 del 27 de diciembre [1]. Estos términos tienen los siguientes valores:

Tarifa: Término de Energía Tenergía=0.047 €/kWh

Tarifa: Término de Potencia Tpotencia=10.48 €/kWmes

El gasto de energía para 5 años es (€):

$$\text{Gasto_Energía_5años}_i := \text{Cons_Total}_i \cdot T_{\text{energía}} \cdot Q_DT_i \cdot 24 \cdot 365 \cdot 5$$

ec. 4-65

Y el de potencia (€):

$$\text{Gasto_Potencia_5años}_i := \text{Cons_Total}_i \cdot T_{\text{potencia}} \cdot Q_DT_i \cdot 5 \cdot 12 \quad j := 0..8$$

ec. 4-66

El coste de membranas por unidad de producto es (€/m³):

$$\text{Costmemb}_j := 600 \cdot \frac{j+1}{Q_DT_j} \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-67}$$

El gasto total (€), ya no por unidad de producto, de las membranas es:

$$\text{Coste_membranas_euros}_i := \text{Costmemb}_i \cdot Q_DT_i \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-68}$$

Sumando todos los costes, tenemos el coste total en 5 años (€):

$$\text{Coste_Total_5años}_i := \text{Gasto_Energía_5años}_i + \text{Gasto_Potencia_5años}_i + \text{Coste_membranas_euros}_i \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-69}$$

Para lograr el coste total por unidad de producto necesitamos el producto que se obtiene en 5 años (m³):

$$Q_DT_5años_i := Q_DT_i \cdot 24 \cdot 365 \cdot 5 \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-70}$$

Dividiendo el coste total en 5 años por el término anterior obtenemos el coste total por unidad de producto para 5 años (€/m³):

$$\text{Coste_Totalm3_5años}_i := \frac{\text{Coste_Total_5años}_i}{Q_DT_5años_i} \quad j := 0..8 \quad \text{ec. 4-71}$$

4.4 REFERENCIAS

1. BOE, Anexo 1 del Real Decreto RD 1436/2002 del 27 de diciembre.
2. B. Peñate, Hybrid reverse osmosis membrane interstage design: thermo-economic analysis, Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, 2010.
3. 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.

