
Equipos desmineralizadores por membranas.

Ecuaciones básicas y parámetros característicos

La figura 1 muestra la configuración de un sistema simple con el esquema de flujos de una membrana de ósmosis inversa, que consta de tres flujos principales: alimentación de agua bruta previamente presurizada por la bomba de alta presión (subíndice a), permeado de baja concentración de sales (subíndice p) y flujo concentrado de rechazo (subíndice r). De aquí en adelante, la inicial Q significa caudal, la C concentración salina, P es la presión absoluta y π es la presión osmótica de una solución salina.

Porcentaje de recuperación (Y): Cociente en tanto por ciento del caudal de permeado obtenido en función del de alimentación.

$$Y = \frac{\text{Caudal permeado}}{\text{Caudal alimentación}} \cdot 100 = \frac{Q_p}{Q_a} \cdot 100 \quad (1)$$

Este porcentaje varía lógicamente en función de la calidad del agua bruta introducida, siendo de un 35 a un 50% en el caso de aguas marinas y mucho mayor en el caso de aguas salobres, hasta el 80% de recuperación.

Porcentaje de rechazo de sales (R): Cociente porcentual entre la concentración eliminada y la concentración de aporte en la membrana.

$$R = \frac{C_a - C_p}{C_a} \cdot 100 \quad (2)$$

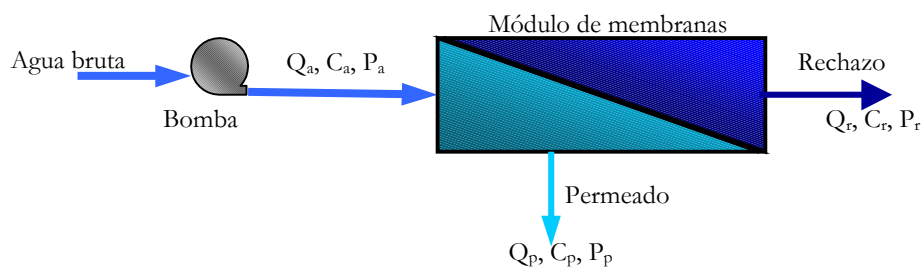


Figura 1. Esquema de flujos de una membrana de ósmosis inversa.
Fuente: Fariñas (1999).

El porcentaje de rechazo de las membranas puede superar el 99%, con lo cual la concentración del permeado baja de las 500 ppm. de TDS en cualquier caso.

Porcentaje de paso de sales (PS): Cociente en tanto por ciento de la concentración producto y la concentración inicial.

$$PS = \frac{C_p}{C_a} \cdot 100 = 100 - R \quad (3)$$

Como consecuencia de lo explicado anteriormente, el porcentaje de paso de sales en una membrana de ósmosis inversa es siempre menor del 2%.

Factor de concentración (F): Es el cociente entre las concentraciones del rechazo y de aportación.

$$F = \frac{C_r}{C_a} \quad (4)$$

Este factor es relación directa con el porcentaje de recuperación de la membrana, a través del balance de materia de la misma. Un valor mayor de 1.5 es lógico en membranas de agua marina, y puede llegar a 4 en el caso de aguas salobres.

Las concentraciones del producto y del rechazo pueden también calcularse en función de parámetros definidos anteriormente:

$$C_p = (1 - R) \cdot (C_a + C_p) / 2 \quad (5)$$

$$C_r = R \cdot C_a / (1 - Y) \quad (6)$$

Las ecuaciones básicas que rigen el comportamiento del proceso son:

Balance de agua:

$$Q_a = Q_p + Q_r \quad (7)$$

Para una instalación de ósmosis inversa de agua marina con 10.000 m³/día de capacidad, suponiendo una conversión del 45% tenemos 4.500 m³/día de permeado y 5.500 m³/día de rechazo.

Balance de sal:

$$C_a \cdot Q_a = C_p \cdot Q_p + C_r \cdot Q_r \quad (8)$$

Siguiendo el ejemplo anterior (una conversión del 45%), si la concentración del permeado obtenida fuera de 300 ppm, y la concentración del agua marina a la entrada de la instalación de OI es de 35.000 ppm de TDS, el concentrado de la salmuera tirada al mar es de 63.400 ppm de total de sólidos disueltos.

Ecuación de flujo de solvente (agua):

El caudal por unidad de superficie J_a se comprueba que es proporcional al gradiente de presión efectiva aplicada a la membrana, es decir, restando la presión osmótica que sufre la membrana con dos soluciones de distinta concentración.

$$J_a = A \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad (9)$$

A es el coeficiente de permeabilidad al solvente típico de la membrana, de valor típico cercano a 0.02 m³/d m² bar, ΔP es la diferencia de presión entre los lados de la membrana y la diferencia de presión osmótica $\Delta \pi$ entre dichos lados de la membrana. Como se ha

comentando anteriormente, es necesaria una diferencia de presión ΔP mucho mayor que la osmótica $\Delta \pi$ (nunca mayor de 30 bar para la concentración del agua de mar mediterránea) para poder obtener permeado, con lo que la diferencia entre ambas puede llegar a ser mayor de 40 bar para aguas marinas.

Ecuación de flujo de soluto (sales):

El flujo de soluto J_s a través de la membrana es la suma de dos contribuciones. La primera es la contribución de la difusión molecular de naturaleza proporcional al gradiente de concentraciones a ambos lados de la membrana ΔC , y la segunda se debe al fenómeno de arrastre del solvente.

$$J_s = B \cdot (C_m - C_p) + M \cdot J_a C_m \quad (10)$$

B es el coeficiente de permeabilidad de la membrana al soluto, cuyo valor típico puede ser $0.003 \text{ m}^3/\text{d m}^2$, M es un coeficiente de acoplamiento de valor 0.005 para todas las membranas. C_m es la concentración del soluto en la superficie de la membrana, que puede calcularse dividiendo las ecuaciones anteriores:

$$C_p = \frac{J_s}{J_a} = \frac{B \cdot \Delta C}{A \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} + M \cdot C_m \quad (11)$$

Hay que tener en cuenta que el fenómeno de polarización que sufren todas las membranas, debido a la baja velocidad de la solución aportada en sus cercanías, hace incrementar el valor de la concentración C_m con respecto a la concentración media de la solución aportada C_{ma} , de valor $(C_a + C_p)/2$.

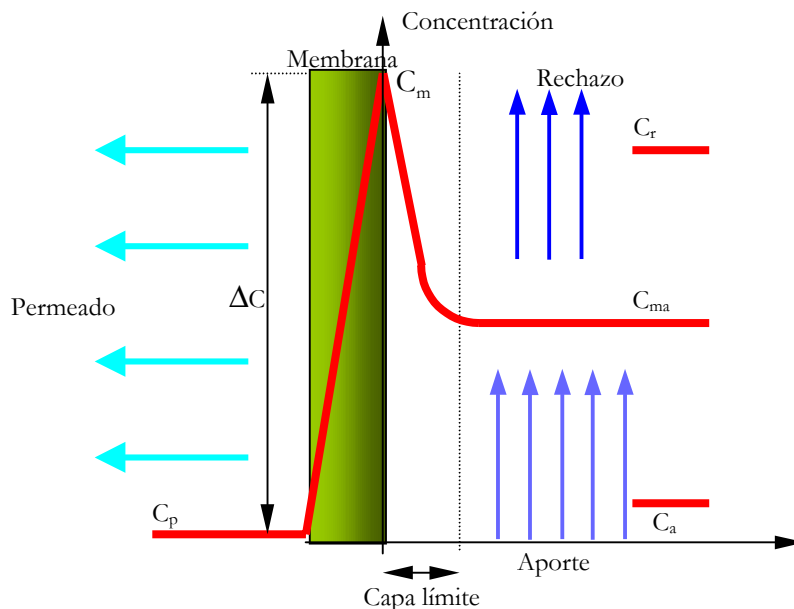


Figura a3.2. Fenómeno de polarización y distribución de concentraciones alrededor de la membrana en el proceso de OI.

Fuente: Fariñas (1999).

Membranas y su agrupación.

Todos estos parámetros anteriormente citados y constantes dependen del tipo de membrana empleado. **Las membranas que se fabrican actualmente se montan dentro de tubos horizontales de diámetros normalizados llamados módulos, para mejorar su rendimiento y la limpieza, minimizar la polarización, hacerlos más compactos y facilitar su sustitución.** Existen dos tipos de membranas contenidas en estos módulos: de fibra hueca y de arrollamiento en espiral, diseñados ambos para contener el fluido en alta presión en el menor volumen para una superficie de membrana dado.

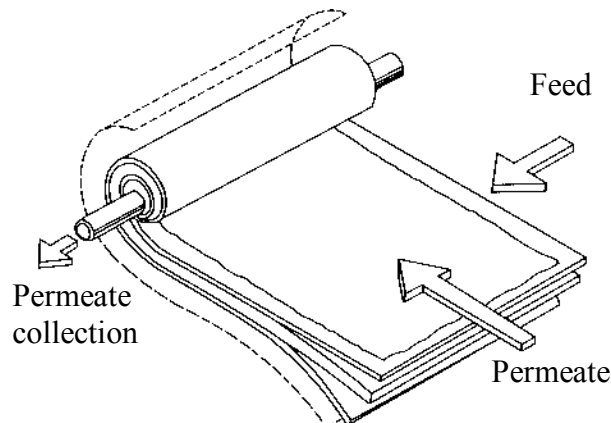


Figura a3.3. Membrana de ósmosis inversa de arrollamiento en espiral.
Fuente: Artal (2000).

Las membranas de espiral están arrolladas en torno a un tubo central perforado que recoge el producto; el agua salada circula en canales separados en una dirección, estos elementos tienen de 30 a 120 cm de largo y de 10 a 30 cm. de diámetro; pueden montarse en tubos telescópicos entre elementos adyacentes para formar módulos, que pueden conectarse en serie ó paralelo. Las membranas de fibra hueca contienen un gran número de ellas tan finas como el pelo humano con su punta pegada a una resina epoxy y mantenidos en una vasija a presión. El agua salada presurizada circula por fuera de las fibras mientras el filtrado circula por el interior de las mismas hacia el final de la fibra donde se recoge el permeado de los miles de fibras; contienen más superficie por unidad de volumen que las espirales, por lo que suelen ser más usadas que las anteriores.

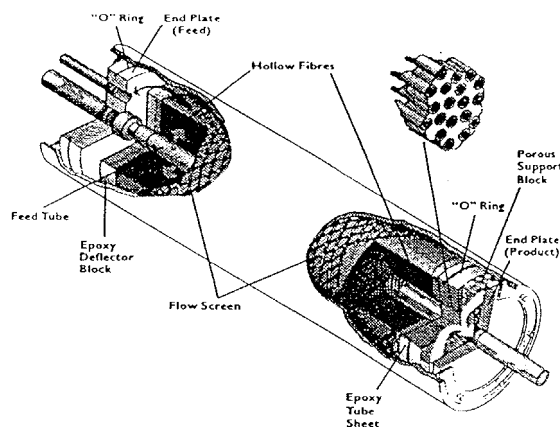


Figura a3.4. Membranas de fibra hueca en instalaciones de ósmosis inversa.
Fuente: Artal (2000).

Las diferencias principales entre los dos tipos de membranas se pueden resumir en estos puntos (Medina, 2000):

- Las membranas de fibra hueca tienen más capacidad ya que ocupan mucha más superficie en el mismo volumen de módulo, aunque sean menos permeables.
- Las de fibra hueca necesitan mayor presión para operar que las de espiral, con lo que su consumo es también mayor.
- La mayor compactación de las membranas de fibra hueca presupone una mayor posibilidad de ensuciamiento de las mismas, con lo que ello conlleva (mejor pretatamiento y sistemas de limpieza).
- El porcentaje de rechazo de las membranas de fibra hueca suele ser ligeramente menor a las de arrollamiento en espiral, aunque siempre mayor del 99%.

Los fabricantes de membranas en el mundo son muy escasos (dos japoneses y varios norteamericanos): Toray, Hydranautics, Koch Membranes, Filmtec-Dow, Osmonics-Desal y Trisep.

Los módulos suelen agruparse en paralelo, constituyendo una etapa el conjunto de los mismos unidos a una bomba. Normalmente se conectan y al rechazo de la etapa anterior (en serie por lo tanto) una cantidad menor de módulos en una segunda etapa para recoger el máximo posible de permeado. En el caso de una calidad alta requerida del producto puede ser necesario permear en la segunda etapa el producto de la primera, con lo que necesitamos una nueva bomba, constituyendo en este caso el segundo paso de la instalación.

3. Equipos de alta presión.

El sistema de bombeo es el segundo elemento a destacar en esta instalación. Existen gran variedad de bombas de impulsión, con dos tipos diferenciados: de desplazamiento positivo (helicoidales o de pistón), o centrífugas (de segmentos, de cámara partida, verticales). Su elección depende del caudal, presión y rendimiento requerido para la misma.

4. Sistemas de recuperación de energía.

Los diferentes sistemas de recuperación de energía más utilizados o de reciente aparición son los siguientes:

- Utilización de turbinas Pelton convencionales o Francis, acopladas al eje del motor de la bomba. Existen equipos integrados que contienen los dos elementos. El ahorro medio conseguido es del 40% (Calder, 1999).
 - Introducción de turbinas de contrapresión, o más bien bombas centrífugas que pueden girar en sentido inverso aprovechando la presión de la salmuera y van por lo tanto de forma integrada en el grupo de alta presión (Fariñas, 1999).
 - Uso de un intercambiador de presión (PE) o también conversor hidráulico centrífugo, que por el principio del desplazamiento positivo presuriza parte del agua bruta con la salmuera a presión rechazada en el proceso y permite ahorros de hasta el 50-65% del consumo (Andrews y Shumway, 1999).
-

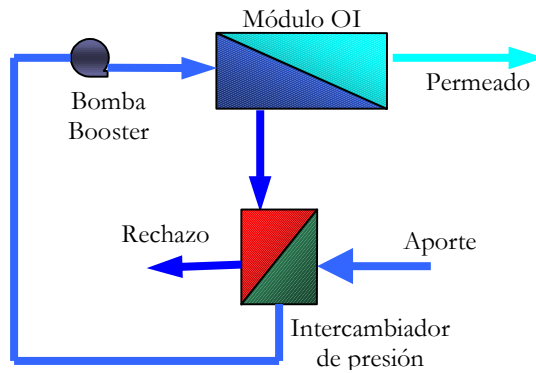


Figura a3.5. Esquema de un proceso de OI con intercambiador de presión (PE).
Fuente: Elaboración propia.

- Uso de convertidores hidráulicos dinámicos o cámaras isobáricas, que por el carácter incompresible de los líquidos y la utilización de un conjunto de válvulas transmiten la presión al agua de alimentación de la salmuera de rechazo.
- Aprovechamiento de la presión del rechazo para instalar un segundo paso de membranas que soporten muy altas presiones (> 90 bar), con la ayuda de una bomba Booster para salvar la diferencia de presiones osmóticas generada en ese segundo paso (Pérez, 2000).

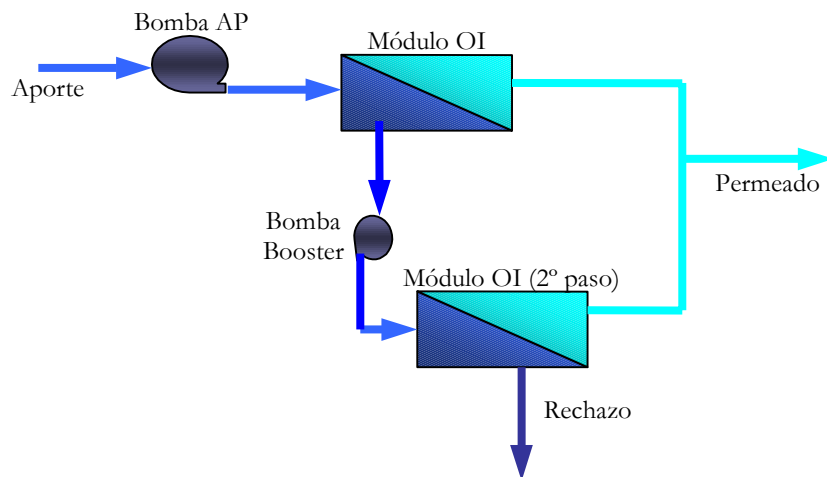


Figura a3.6. Esquema de instalación de un segundo paso para aprovechar la presión de salmuera.
Fuente: Elaboración propia.