

ÓSMOSIS INVERSA; FILTRACIÓN POR MEMBRANAS SEMIPERMEABLES

El proceso de ósmosis normal o también llamada directa, representa la respuesta natural de un sistema discontinuo cuando dos recipientes con soluciones a diferentes concentraciones se ponen en contacto por medio de una membrana semipermeable.

El flujo osmótico se origina del recipiente de solución diluida al recipiente de solución concentrada (diagrama a, figura 1). Es un proceso espontáneo para llevar el sistema a su estado de equilibrio y que no deja de ser un ejemplo de la genérica ley de entropía. Ello ocurre cuando el flujo osmótico eleva una columna de líquido sobre la solución concentrada, cuyo peso produce la presión osmótica de equilibrio (diagrama b, figura 1).

La segunda ley de la termodinámica asegura que este proceso es irreversible, en vista de que para reintegrar el sistema a su estado inicial tiene la necesidad de realizar un trabajo mecánico neto y contrario al aportado. Esta labor mecánica se realiza en la solución concentrada, de tal manera que el flujo del solvente ocurre en dirección opuesta al flujo osmótico original (ósmosis inversa). Para que tal cosa se realice, es obligatorio que la presión aplicada tenga un valor mayor a la diferencia de las presiones osmóticas entre los recipientes (véase el diagrama c, figura 1).

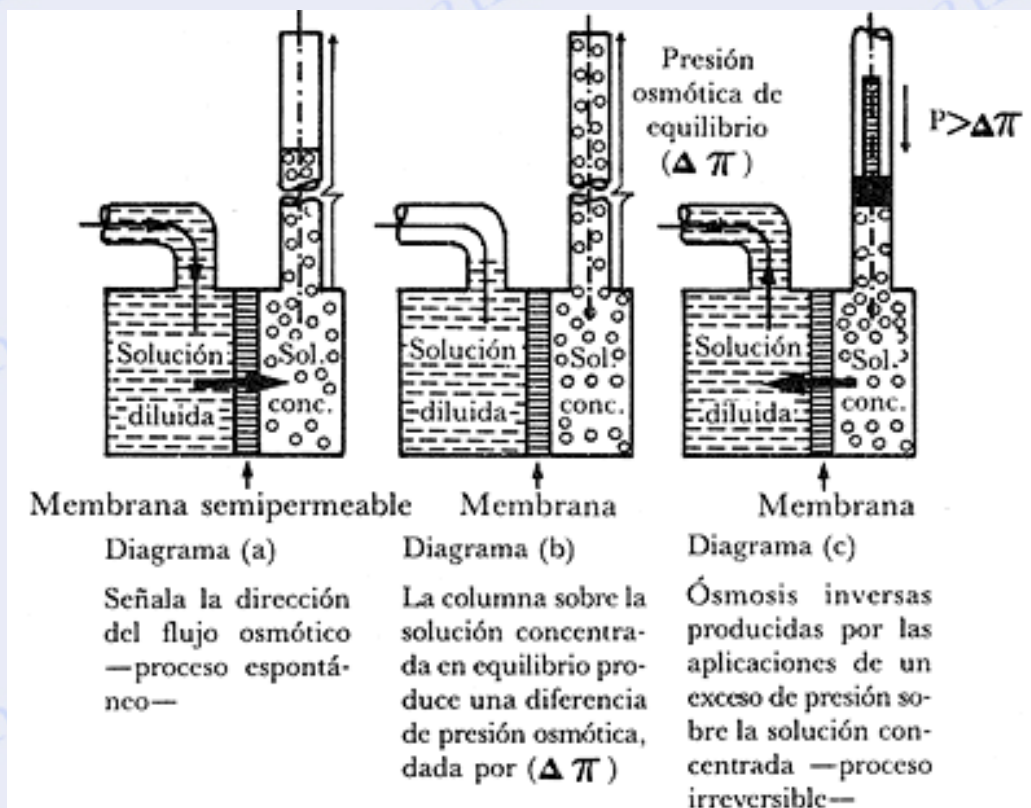


Figura 1

El proceso de ósmosis inversa fue propuesto por primera vez por Charles E. Reid en 1953 para obtener agua potable del agua de mar. La propuesta de Reid fue sometida a la consideración de la Oficina de Aguas Salinas de **EUA** y surgieron algunas objeciones, una de ellas consideraba a la ósmosis inversa como un proceso impráctico y que en caso de funcionar, sería tan solo una curiosidad de laboratorio.

La duda más seria a la propuesta de Reid fue cuando se hizo ver que se carecía por aquel entonces de una membrana adecuada para realizar eficientemente el proceso de ósmosis inversa. En efecto, al aprobarse el proyecto Reid se enfrascó en un problema mayúsculo para conseguir la membrana que tuviera la capacidad de realizar ese proceso. Las dificultades básicamente eran las siguientes:

- Carencia de una membrana que resistiera químicamente las soluciones salinas.
- Las membranas eran muy poco porosas para permitir el libre tránsito del solvente (agua pura) y demasiado abiertas para tener un adecuado coeficiente de reflexión de Staverman (bajo rechazo de sales).

c) La saturación de la membrana requería una limpieza periódica o su sustitución.

La solución del problema de la separación de agua pura a partir de agua de mar o aguas salobres fue resuelta por el descubrimiento de la membrana de acetato de celulosa por el mismo Reid y E. J. Breton en 1959.

A este descubrimiento siguió otro efectuado por S. Loeb y S. Sourirajan en los años de 1960 a 1962 al demostrarse que la membrana de Reid y Breton mejoraba considerablemente el flujo de solvente y rechazo de sales, si la membrana se hacía asimétrica en lugar de homogénea. Luego se supo, por observaciones al microscopio electrónico, que la asimetría en la membrana de Loeb y Surirajan se debía a la presencia de una delgada película de polímero en fase amorfa con secciones cristalinas sobre la superficie de la membrana. Esta película es la parte activa de la membrana y responsable de la exclusión de los solutos. El cuerpo restante de la membrana sirve de soporte y es una estructura polímera esponjada altamente porosa.

Con este tipo de membrana se realizó eficientemente el proceso de ósmosis inversa, acallando a los que pensaron que esa inversión nunca funcionaría.

En un principio se creyó que el proceso de ósmosis inversa sería altamente eficiente, pues se pensó que bastaría con exceder la presión osmótica del sistema para lograr la inversión osmótica por simple inversión de la ósmosis directa. Aquí no se tomaba muy en cuenta la segunda ley de la termodinámica debido a que se requiere un trabajo extra para su funcionamiento en contra de irreversibilidades y entre más lejos del equilibrio se opere, mayor será ese aporte de energía. En realidad, resultó que el funcionamiento de dicho efecto requiere de la aplicación de una presión mucho mayor (4 ó 5 veces mayor) al valor de la presión osmótica efectiva e invertir energías a razón de 10 veces más que la requerida teóricamente, si el proceso fuera reversible, por ejemplo, la presión osmótica del agua de mar es de 24 atmósferas, mientras que los equipos que obtienen agua potable a partir de agua de mar operan en la práctica con presiones de 100 atmósferas o mayores.

Uno de los logros de la década de los años sesenta fue hacer económica la aplicación de la ósmosis inversa en la obtención de agua potable a partir de aguas salobres o para mejorar el agua potable doméstica y entrar francamente en competencia con otros sistemas de separación de pequeña o gran escala como era la destilación y otros. Esta posibilidad fue una consecuencia de la perfección de la membrana de acetato de celulosa y un entendimiento más claro de los procesos de interacción de una solución salina con dichas membranas.

En esta década se consiguió comprender los efectos de compactación y de oclusión de las membranas bajo operación, así como percibir la necesidad de tratamientos bioquímicos del agua de alimentación, por la presencia de microorganismos que utilizan a la membrana como nutriente. En particular, el conocimiento de la capa de polarización como efecto adverso fue decisivo en los avances anteriores. Este efecto se ha señalado como el recíproco del osmótico y es causa de la formación de una capa de iones cuando durante el tránsito del flujo volumétrico se acumulan solutos que no pueden pasar y se concentran a la entrada de la membrana. Esta capa de iones salinos elevan la presión osmótica local de la solución frente a la membrana y por lo mismo aumenta la presión de operación para mantener un flujo del solvente. La eliminación de este efecto adverso fue determinante en el diseño de los módulos que sirven de apoyo a la membrana, en vista de que para eliminar esa capa de polarización se utiliza la agitación convectiva, provocando un flujo turbulento en la solución alimentadora con el propósito de un lavado tangencial de la membrana. De esta manera, las celdas donde las membranas ejecutan la separación, presentan diseños geométricos reticulares de manera que los flujos sean violentos y con turbulencias (altos números de Reynolds).

Otro de los avances de la década de los sesenta fue la elaboración de modelos que interpretaban los procesos de transporte de una membrana. Entre otras están las aportaciones de H. K. Lonsdale, U. Merten y R. L. Riley en 1965. El año siguiente se conocen las contribuciones de Spiegler y Kedem, Gradzinski y Kedem, Mears y Merten. Estos modelos siguen los alineamientos teóricos dados por Kedem Katchalsky en 1958 y predicen relaciones entre distintas

variables del sistema, como los flujos de soluto y solvente, porcentaje de rechazo, espesor y permeabilidad de la membrana. Esto permitió un manejo adecuado de los parámetros de diseño en la construcción y verificación de plantas de prueba o pilotos y luego su comercialización en plantas del orden industrial.

En la década de los años sesenta, el estudio y aplicación de la ósmosis inversa se relacionó con la desalación de aguas salinas y del tratamiento de aguas de reúso, como la purificación de agua de desechos industriales, urbanos y de drenaje.

Por otra parte, en la década de los setenta se consiguió un conocimiento más detallado sobre el funcionamiento de la membrana osmótica; en particular se discutió el mecanismo por el que una membrana de acetato de celulosa permite el paso del solvente e impide el tránsito de los solutos.

El fenómeno de la causa de la selectividad de una membrana osmótica fue discutido primeramente en los trabajos de Reid y Breton en 1959, constituyendo una constante preocupación en las explicaciones físicas de los modelos de la década anterior.

Algunos puntos se establecieron en la década de los sesenta y aparecen en nuestra época como un conocimiento fraccionado. Algunas teorías han formulado una explicación sobre la causa del fenómeno de la selectividad de una membrana, sin que existan correlaciones de observaciones experimentales donde se observe claramente la influencia de las propiedades de las estructuras poliméricas. Este problema al parecer no está aun resuelto y pone de relieve la necesidad de estudiar a nivel fundamental la interacción de una solución electrolítica con un material polimérico.

La información básica que se obtiene del mecanismo de la selectividad en la década de los sesenta, es su relación con la presencia de grupos químicos o radicales en las cadenas poliméricas en el material de la membrana. Estos grupos químicos rechazan los iones por acciones electromagnéticas, a la vez que se permite el acceso de las moléculas de agua por propiedades hidrofílicas de la membrana; es decir, el agua es absorbida por el material polimérico y transmitido de un punto a otro

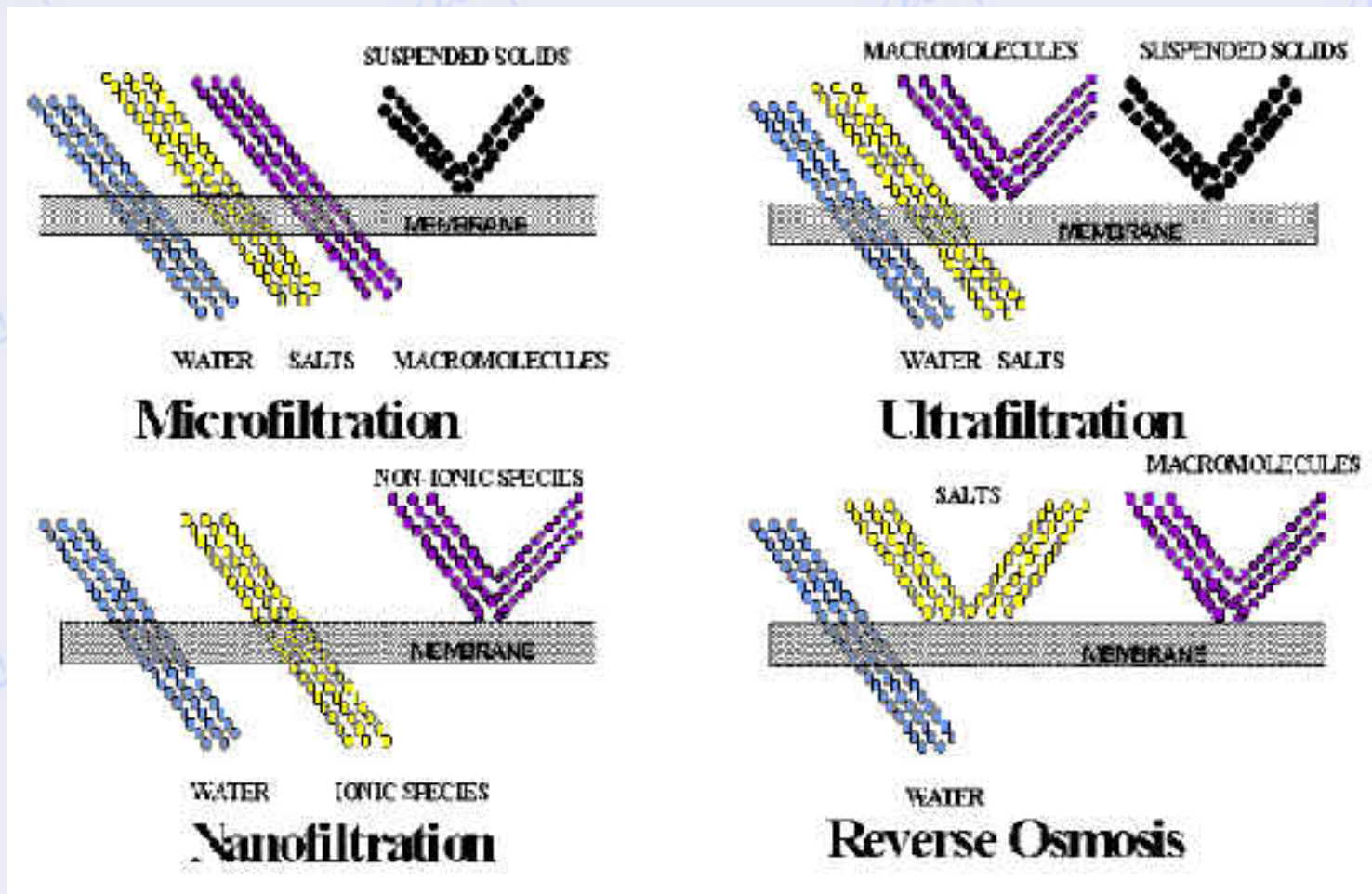
por influencia de transiciones en los puentes de hidrógeno; esto ocurre cuando no hay espacios porosos para un flujo volumétrico, estableciendo otro concepto de filtración añadido al propiamente macrofísico asimilado al concepto de porosidad. De manera que se confirma la importancia de aglutinar centros de rechazo en la superficie de una membrana hidrofílica.

El conocimiento de estos mecanismos de selectividad permitió predecir con acierto el comportamiento de las membranas en variadas aplicaciones. También aparecieron nuevas membranas utilizando otro tipo de polímeros que presentan más ventajas en comparación con las de acetato de celulosa, al tiempo que mayor eficiencia.

En esta década de los setenta, se logró dar una clasificación útil de las membranas en relación a procesos de separación y el mecanismo de acción a su vez relacionada con su estructura. Después de todo, la ósmosis inversa ha ganado por méritos propios, gran popularidad. Se recrearon métodos de operación con diversas membranas cada vez más eficientes, y actualmente existe un sinnúmero de aplicaciones industriales y domésticas con bajos costes de instalación y mantenimiento.

TIPOS DE MEMBRANAS PARA TRATAMIENTO DE AGUA; MICROFILTRACIÓN ULTRAFILTRACIÓN NANOFILTRACIÓN Y O.I.

Las membranas de [OSMOSIS INVERSA](#) (RO), [ULTRAFILTRACIÓN](#) (UF), [NANOFILTRACIÓN](#) (NF) y Microfiltración (MF) ofrecen muchas ventajas contra tratamientos de agua convencionales: Tecnología de primer nivel, "Tratamiento Limpio" ya que casi hace desaparecer el uso de químicos en la operación, reduce importantes costos de operación y disposición, sistemas automatizados, mediciones más controladas y confiables, espacios reducidos, flujos y calidades constantes y muchos otros fácilmente verificables. Existen para todos tipos de aplicaciones: Agua Residual, para Proceso, Pura, Ultrapura, Potable, Sanitaria, Biológica, Municipal y para todos los flujos.



Aunque las técnicas convencionales mecánicas dominan las separaciones líquido sólido, la filtración por membranas esta ganando aceptación en un gran número de aplicaciones. La tecnología ha sido aplicada en campos desde biotecnología y electrónica hasta en procesos de comida y papel. Por ejemplo en el pulido del efluente de fotoacabado, contéo de microbios, intermediarios farmacéuticos, recuperación de ácidos carboxílicos, y clarificación de aldehídos metálicos.

Paradójicamente la filtración por membrana ha encontrado su uso más amplio en las aplicaciones más demandantes, procesos como desalinización, que requiere el poro de membrana más pequeño y la mayor diferencial de presión. En los últimos 20 años, se ha visto un incremento constante en el uso de membranas. Esto logra que la tecnología hacer más eficiente a la tecnología y al cubrir mayores demandas, los precios tienden a la baja.

Esta aceptación se debe a un número de factores. Primero a diferencia de los sistemas mecánicos de separación como la centrifugación, mallas o filtración tradicional. Las membranas pueden trabajar en continuo, ahorrar energía, son fácilmente escalables y combinables con otros procesos. Además las unidades trabajan en condiciones medias de proceso sin aditivos, mientras que sus propiedades pueden acercarse a las especificaciones de los usuarios finales.

Las membranas para tratamiento de agua, pueden trabajar en continuo, ahorrar energía, son fácilmente escalables y combinables con otros procesos. Además las unidades trabajan en condiciones medias de proceso sin aditivos, mientras que sus propiedades pueden acercarse a las especificaciones de los usuarios finales.

La filtración por membranas demostró un gran potencial en lo que se conoce como descarga cero y al ir minimizando el desperdicio en compañías de industrias muy diversas.

Sin embargo, estos elementos todavía no son perfectos, existen deficiencias inherentes por ejemplo, en la Microfiltración cuando se intenta filtrar partículas de 0.10 a 10 micras de diámetro y en la **ULTRAFILTRACIÓN** donde los rangos de diámetros van de 0.01 a 0.1 micras, en estos casos las partículas de mayor peso molecular tienden a bloquear la superficie de la membrana, causando contaminación de los materiales de soporte y disminuyendo la eficiencia. En estas circunstancias será necesario un prefiltro.

Cuando las partículas de menos de 0.01 micra de diámetro requieren ser retenidas, se puede aumentar la presión de la unidad de filtración para aumentar la retención, o el flux. Sin embargo cuando las partículas son mayores de 0.01 micras, el aumentar la presión causa que la calidad de salida disminuya.

Estas membranas están siendo incorporadas al tratamiento de agua cada vez más frecuentemente, ya que NO requieren de químicos para los diferentes tratamientos.

Las membranas son capas de hojas muy delgadas microporosas sujetas a una estructura de soporte más gruesas y porosa, generalmente hecha

de polipropileno, poliéster o hasta de politetrafluoretileno. A diferencia del papel o la tela, el material de las membranas que varía desde acetato de celulosa o cerámicos y otros polímeros como polisulfonatos, polivinildieno, funcionan como filtros asimétricos. En general, la resistencia al flujo y la caída de presión depende del lado de la membrana que de al flujo de proceso.

En la filtración por membrana, las capas, superiores son las que tienen contacto directo con el agua o fluido a tratar, y la estructura de soporte tiene poros que generalmente se hacen más grandes al irse alejando de la superficie.

Al aplicar diferencias de presión moderadas se provoca que la membrana actúe como una malla. El tamaño físico de las moléculas de soluto o partículas determina si se permean o se quedan en el lado de la superficie como concentrado.

Dependiendo de la composición de la membrana y el tamaño de poro de su capa delgada, los procesos pueden diseñarse para separar moléculas o partículas de tamaños cada vez más pequeños, a un punto donde en esencia todos los sólidos disueltos y suspendido sean rechazados.

Otro modo de entender cómo funciona una separación por membranas es relacionar los rangos de separación con el tipo de material retenido. Por ejemplo la filtración convencional captura partículas suspendidas solo mayores de 1-10 micras. La Microfiltración por membrana rechaza partículas 10 veces debajo de un micrómetro. La **ULTRAFILTRACIÓN** rechaza macromoléculas como las proteínas; la **NANOFILTRACIÓN** rechaza sales divalentes, azúcares y ácidos disociados; la **ÓSMOSIS INVERSA** rechaza sales monovalentes y ácidos no disociados.

En general se pueden decir que los procesos de membranas usan una barrera permeable para filtrar componentes seleccionados de mezclas. Los sistemas de procesamiento con membranas pueden disminuir los costos de energía, eliminar emisiones y mejorar la calidad del producto en alguna aplicación.

Al irse entendiendo mejor el uso de separación por membranas, habrá mayores aplicaciones que quieran mayores fluxes. Definimos el flux

como el volumen de permeado por unidad de área y tiempo.

El flux varía de acuerdo al rango de separación de la membrana, y el modo en que varía es diferente en cada rango

La relación lineal entre el flux y la presión con la ósmosis inversa se hace más problemática en el rango de Microfiltración. A presiones mayores de 1 bar; el flux decrece. Para mantener los fluxes cuando se usa una membrana en el rango de Microfiltración es esencial prevenir incrustaciones de los rechazos en la superficie de la membrana o dentro del soporte de la membrana. Esta acumulación de material aumenta la resistencia al flujo de permeado.

Las membranas de filtración original se hacían de acetato de celulosa. Sin embargo el material no soporta niveles de pH que salgan de 2 a 9 y en temperaturas arriba de 35°C. Además las membranas de acetato de celulosa tienen una resistencia química limitada.

Para resolver estas limitantes se han desarrollado cerámicos y membranas poliméricas, incluyendo polisulfonatos fluoruro de polivildieno y poliacrilonitrilos. Comparadas con las de acetato de celulosa, las membranas de polisulfonatos están hechas para desempeño en un rango de pH entre 1 a 14, a una temperatura máxima de 110°C, con buena resistencia química.

Los cerámicos se usan en sistemas tubulares, generalmente en aplicaciones donde se necesita resistencia a pH extremos y niveles de temperatura extremos.

Muchos de estos materiales han sido combinados en estructuras de composita como los metales cerámicos o en estructuras multipoliméricas, en donde una membrana delgada de un material, por ejemplo, polisulfonato es añadido a la superficie de un material de soporte diferente como el poliéster.