
3. OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa es un proceso industrial en donde el agua se desmineraliza al ser inyectada a altas presiones sobre un conjunto de membranas semipermeables, como las utilizadas en una planta de desalación. Este proceso, es contrario a la ósmosis que de manera natural se presenta en algunos animales y plantas, pero fundamentalmente en éstas últimas. Las células de una planta actúan como una membrana semipermeable: el agua atraviesa las membranas pero las sales no; es decir, las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas, a través de una membrana semipermeable, sin necesidad de aplicar ninguna fuerza externa. El proceso de ósmosis inversa (Figura 3.1) se basa en las propiedades de las membranas semipermeables de dejar pasar con más facilidad el agua dulce que el agua salada, creándose así una diferencia de potencial hidráulico entre esos dos líquidos cuando cada uno se sitúa a un lado de la membrana.

Aumentando convenientemente la presión en el lado del agua salada se puede hacer pasar el agua al compartimiento menos salino, dejando atrás parte de las sales. El problema principal reside en la obtención de membranas baratas y resistentes a la presión diferencial, campo en el cual se está realizando un gran esfuerzo y en el que ya se han conseguido metas importantes.

La presión neta de trabajo (PN) es la que obliga al agua a atravesar la membrana, la PN es la diferencia entre la presión aplicada en ambos lados de la membrana (lado de alimentación y del permeato). Si existe mayor presión en el lado de alimentación de la membrana el agua pasará hacia el lado del permeato, si la presión total es mayor en el lado del permeato el agua seguirá otro camino. En el caso de que la presión sea igual en ambos lados de la membrana no se presentará movimiento neto del agua.

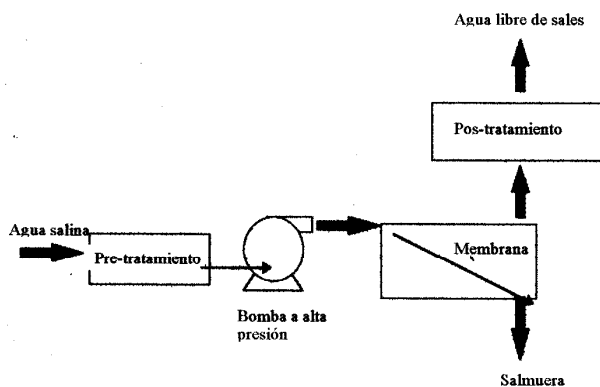


Figura 3.1 Diagrama de flujo de un sistema de ósmosis inversa.

Para evitar problemas en plantas de OI, se necesita entender como es que el agua y las sustancias disueltas pasan a través de la membrana, para ello se deben destacar algunos puntos:

- * La cantidad del permeato producido en una unidad de tiempo es directamente proporcional a la PN y a la temperatura del agua de alimentación. Si se dobla la PN, mientras la temperatura permanece constante, se obtendrá el doble de la cantidad del agua que pasa a través de la membrana. Se puede trabajar con presiones diferenciales de hasta 100 atm.
- * La cantidad de sustancias disueltas que pasan a través de la membrana en una unidad de tiempo es directamente proporcional a la diferencia que hay entre las concentraciones del lado de alimentación y el permeato.

En la actualidad, instalaciones típicas de desalación de agua por OI pueden separar el 98% de las sales en concentraciones de Sólidos Disueltos Totales (SDT) hasta de 3,000 mg/l y flujos de 24 l/m²/d, garantizando la vida de las membranas hasta en 5 años. La capacidad de producción varía de 25,000 a 60,000 l/d/m².

Las membranas pierden permeabilidad si el agua original lleva un exceso de sílice disuelto o de hierro, la presencia de materia orgánica también es nociva. El agua de alimentación debe tener una turbidez y contenido en materias en suspensión muy bajo. Típicamente una membrana de ósmosis inversa procesa un agua de mar de 36,000 ppm SDT y la convierte en agua dulce con una salinidad inferior a 50 ppm SDT.

Deben implementarse controladores de nivel y de flujo en los sistemas de alimentación de químicos y la planta debe de contar con un sistema de paro automático cuando la alimentación del anti-incrustante falle. Los cartuchos de filtración son indispensables para tratar agua superficial y subterránea y deben de remplazarse cuando la diferencia de presión a través del filtro alcance los 103 kPa.

Los compuestos orgánicos que son inmisibles en agua pueden afectar el funcionamiento de las membranas. Las plantas de ósmosis inversa operan típicamente con alimentaciones conteniendo cuando mucho 20 mg/l como carbón orgánico total. También las bacterias y algas causan taponamiento, contaminación del agua y degradación biológica de algunos tipos de membranas.

El aluminio y ciertos polímeros aniónicos son ejemplos de aditivos químicos que no deben ser utilizados. El aluminio a concentraciones mayores a 0.1 mg/l (como Al^{+3}) puede ser un problema para la ósmosis inversa. Los aceites y las grasas pueden afectar la capacidad de las membranas ya que forman una capa en la superficie, afectando su capacidad de retención. La ósmosis de agua de mar presenta ciertas peculiaridades que no se encuentran en el agua salobre, las cuales se deben de considerar en el diseño para evitar problemas. Éstas se resumen en:

1. El agua de mar es mucho más corrosiva que el agua salobre, por lo que se debe tener mucho cuidado con la selección de todos los materiales de la planta.

-
2. Las bombas de alta presión de desplazamiento positivo con frecuencia inducen pulsaciones en las tuberías.
 3. Es necesario considerar la posible erosión y cavitación por los cambios bruscos en las presiones.
 4. La creencia falsa de que el agua de mar es igual en todos lados lleva con frecuencia a errores serios de diseño y operación en las plantas desaladoras. En realidad el agua de mar tiene características muy diferentes y específicas en las diferentes regiones del mundo y de cada mar.

Antes de tomar alguna decisión sobre una planta de ósmosis inversa se debe considerar detenidamente la fuente de suministro de agua de mar. Esto es muy importante, ya que la calidad del agua de mar tiene una gran repercusión sobre la intensidad, costo y dificultad de operación del pretratamiento que requiere dicha agua antes de poderla alimentar a las membranas de ósmosis inversa. El concepto básico es que, aunque la ósmosis le remueve las sales al agua así como algas, moluscos, bacterias, virus y patógenos, no es conveniente alimentarle a las membranas de ósmosis agua contaminada con materia que las pueda ensuciar.

El factor más importante en una planta de agua de mar es el servicio, no se deben de adquirir plantas que no incluyan entrenamiento completo de los operadores para hacerlos autosuficientes.

Toda planta de ósmosis con capacidad superior a los 1,000 m³/día debe de incluir un banco de prueba. Este banco de prueba permitirá probar uno a uno los elementos de ósmosis inversa a las condiciones de presión y de flujo de operación, de manera que este permita verificar elementos que estén defectuosos o sucios. El banco de prueba estará instrumentado para poder comprobar el caudal y calidad de producto, el caudal de rechazo, la presión diferencial, así como la presión de prueba. El banco de prueba debe de estar equipado con conexiones de limpieza para permitir el lavado individual de cada elemento en caso necesario.

Dentro de las ventajas más relevantes de la OI se pueden nombrar:

- * La realización eficiente y económica del proceso en una etapa, en rangos de concentración de 400 a 10,000 ppm (agua de mar).
- * Operación continua y poco espacio para sus instalaciones.
- * Pueden diseñarse plantas modulares adecuadas a cada necesidad particular, desde un metro cúbico al día hasta grandes producciones con varios módulos
- * Los costos de instalación son más bajos que en el caso de la destilación

Sus principales desventajas:

- Las membranas son sensibles a daños
- El agua de alimentación requiere ser pretratada la mayoría de las veces
- Requiere equipos y materiales de alta calidad
- Es necesario personal calificado para su diseño, construcción y operación
- Debe contarse con inventario suficiente de piezas de repuesto
- Existe el riesgo de contaminación bacteriana de las membranas
- Los costos de operación son considerablemente más altos que los de una planta de destilación instantánea en múltiples etapas.

En el Cuadro 3.2 se presentan las características de los principales sistemas de desalación y en el Cuadro 3.3 se resumen los aspectos más importantes de cada uno de ellos.

Cuadro 3.2 Características más destacadas de los principales sistemas de desalinización.

Proceso	Siglas	Fuentes de energía	Consumo de energía ¿depende de la salinidad?	Características Principales
DESTILACIÓN				
1. <i>De múltiples efectos</i>	DME			
1a. De tubos sumergidos (submerged tube)	TS	Et	No	El sistema más conocido y más usado. Es normal obtener agua con menos de 10 ppm de residuo seco. El vapor saliente de un evaporador calienta al siguiente. La evaporación mediante tubos sumergidos (TS) está en desuso y sólo quedan plantas antiguas. Actualmente se utilizan evaporadores de tubos largos verticales (TLV) con evaporación en película descendente (falling film). Aunque el sistema tiene muchos partidarios y ciertas ventajas es menos usado que el DSME. Ciertas unidades prevén un precalentamiento de alimentado mediante un sistema de DSME.
1b. De tubos largos verticales (long vertical tubes)	TLV		No	
2. <i>Instantánea en múltiples etapas</i> (multistage flash)	DFME	Et	No	El agua salada caliente se evapora súbitamente en etapas cada vez a menor presión. Es el sistema más utilizado actualmente. Cada unidad de múltiples etapas equivale a un efecto. Se han ensayado sistemas de múltiples efectos, cada uno con múltiples etapas (MEME); combina DME y DSME.
3. <i>Compresión de vapor</i> (vapor compression)	DCV	Em Et	No	El vapor se comprime y sirve para calentar la salmuera, que luego se evapora (súbitamente o con tubos). Tiene ventajas para pequeñas unidades. Se pueden sustituir los compresores mecánicos (Em) por eyectores de vapor, en cuyo caso hace falta un generador de vapor (Et).
4. <i>Solar</i> (solar)	DS	Es	No	El sol calienta un estanque cubierto con un techo transparente, sobre el que condensa el vapor. Precisa de grandes superficies y han de establecerse en localidades con clima y latitud adecuada.
DE MEMBRANA				
1. <i>Electrodíalisis</i> (electrodialyse)	ED	Ee	Si	En general existen problemas de producción de membranas adecuadas (capacidad y operación). Sólo para aguas salobres (menos de 2000 a 5000 ppm). Produce una agua menos salina, pero no pura. En general son unidades pequeñas. La energía eléctrica separa los iones de agua.
2. <i>Osmosis inversa</i> (reverse osmosis)	OI	Em	Si	La presión hace pasar el agua por la membrana dejando atrás las sales. Aún poco desarrollado. Buenas perspectivas. Para aguas hasta 10000 ppm y quizás para agua de mar. A veces se le llama <u>ultrafiltración o hiperfiltración</u> .
SOLIDIFICACIÓN				
1. <i>Congelación</i> (freezing)	C	Em	No	En desarrollo. Pocos problemas de corrosión, pero dificultades de proceso, separación y lavado. El agua se congela y se separan los cristales del hielo. Futuro difícil. Problemas en el sistema de vacío. En zonas con noches frías se puede obtener hielo por congelación nocturna.
2. <i>Separación de hidratos</i> (hydrate separation)	SH	Em Et	No	Ciertas sustancias forman hidratos insolubles que se separan y luego se descomponen térmicamente. Es posible que se desarrolle, pero aún está en estudio.
PROCESOS FÍSICO QUÍMICOS				
1. <i>Cambio iónico</i> (ionic exchange)	II	Eq	Si en gran manera	Los iones se fijan en resinas sintéticas produciendo una agua libre de los mismos; las resinas se regeneran químicamente. Sólo para aguas poco salobres. Muy usado en industria para agua de proceso, pero con un difícil futuro en grandes plantas. Puede ser útil en pretratamientos.
2. <i>Extracción por solvente</i> (solvent extraction)	ES	Eq	No	Un solvente extrae agua sin sales, la cual se recuperará después. En fase de estudio con notables avances, aunque con un futuro incierto por el momento. Pueden existir problemas de contaminación por solvente.

Et= energía térmica; Em= energía mecánica; Ee= energía eléctrica; Eq= energía química; Es= energía solar



Cuadro 3.3 Resumen de opciones de desalinización

Tecnología	Solar		Destilación en Múltiples Etapas		Destilación Súbita en Múltiples Etapas		Compresión de vapor		Osmosis inversa		Electrodialisis		Separación por congelación	
	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No	Si	No
¿ Probada ?														
Tipo de Energía	Térmica		Térmica y eléctrica		Térmica y eléctrica		Mecánica o eléctrica		Mecánica o eléctrica		Eléctrica		Térmica y/o eléctrica	
Factores en la demanda de potencia	Temp. ambiente, viento, insolación		Temp. ambiente y de agua a tratar		Temp. ambiente y de agua a tratar		Eficiencia de intercambio de calor		Salinidad del agua, recuperación de energía		Salinidad del agua		Temperatura ambiente	
Consumo de energía (kWh/m ³)	642 253* 642**		32 (Et) 1 a 2.5 (Ee) 64.2** 2.02 a 4.05 (Ee)** 17.8 (Et)**		48 a 441 (Et) 3 (Ee) 18 a 137* 21 (Et)** 2.8 a 5.6 (Ee)**		11 a 25 8.10 a 12.15***		4 a 17 2 a 17** 4.7 a 12.6***		0.8 a 11 10.8 **		6 a 108 93**	
Costos inversión (USD/m ³)	9,000 a 66,000		1,000 a 12,000		800 a 15,000		1,100 a 4,200		1,600 a 2,000		280 (salobre)		2,400	
Estimación costos ciclo de vida (USD/m ³)	3.4 a 50 9 a 12*		0.7 a 4		1.2 a 4.2		0.5 a 5.0		0.5 a 3 0.22 a 1.53**		0.5 a 3 (salobre)		No determinado	
Tamaño típico de instalación (m ³ /día)	0.005 a 5		1,000 a 10,000 2,000 a 10,000*		1,000 a 100,000 3,000 a 30,000*		2 a 1,000 18 a 1,900*		0.01 a 10,000		0.1 a 200		No determinado	
Retamiento requerido	Ninguno		Filtración, control de incrustaciones, de aireación		Filtración, control de incrustaciones, de aireación		Filtración, control a escala		Filtración, otros (depende del agua a tratar)		Filtración, otros (depende del agua a tratar)		No determinado	
Mantenimiento requerido	Inspección y reparación de goteras, remoción de polvo y sales		Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas		Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas		Control de corrosión e incrustaciones, mantenimiento de bombas		Reparación de filtros, limpieza de membranas, mantenimiento de bombas, control de corrosión		Reparación de filtros, limpieza de membranas, mantenimiento de bombas		No determinado	
Complejidad operacional	Baja		Alta		Alta		Alta		Depende de la tasa de recuperación y pretratamiento		Depende de la tasa de recuperación y pretratamiento		Alta (separación de hielo)	
Requerimiento de repuestos	Ninguno		Filtro		Filtro		Filtro		Filtro (mensual) Membranas (2 a 5 años)		Filtro (mensual) Membranas (10 años)		uno	
Rango de salinidad	Amplo		Amplo		Amplo		Amplo		Amplo		<10,000 mg/L		Amplo	

Fuente: Karen E. Thomas. 1997.* Emilio Custodio y Manuel Ramon Llamas(1976). **David L. Block (1989) menciona que la DSME y la OI muestran una gran variación en la relación energía-producción. *** California Coastal Commission WEB (1997). * Marnadou Keita (1990). * O.K. Buros(1990)