

Indice

Pagina

Introduccion 2

Principales procesos 3

Destilación súbita por efecto flash (MSF). 3

Destilación por múltiple efecto (MED). 4

Compresión térmica de vapor (TVC) 5

Destilación solar. 5

Congelación. 6

Formación de hidratos. 6

Destilación por membranas. 6

Compresión mecánica de vapor (CV). 7

Osmosis inversa 7

Descripcion 7

Presiones 7

Membranas 8

Pretratamientos 8

El proceso de la desalacion 9

Concentracion hisdrostatica 9

Imposicion 10

Control de ensuciamiento de los sistemas 11

Co-generacion 12

Electrodialisis (ED). 13

Intercambio iónico 13

Resumen tecnologias 14

Situacion actual 14

La desalacion en España 15

Resumen 16

Problematica de la salmuera 16

Bibliografia 18

• **Introduccion:**

Entendemos la desalacion como el proceso fisico de separacion de sales de una disolucion acuosa para utilizar el agua del mar en las zonas costeras con escases de agua potable. El sistema fisico de eliminacion de las sales por destilaciones y condensaciones sucesivas ya era conocido desde la antigüedad. Pero necesitaba un consumo grande de energia que no lo hacia relevante. Tras el transcurso de los años se mejoraron los procesos que implicaban un menor consumo de energia, utilizandose a la tecnologia de la osmosis inversa que es la mas utilizada actualmente. Llegandose a precios inferiores de tratamiento de 100 pts/m³. Aun cuando la destilacion subita por efecto flash es masivamente utilizada en los paises Arabes. Asi pues se puede llegar a transformar un agua salada con un contenido en sales de 35000 ppm a un agua con un contenido en sales inferior a 500 ppm que la entendemos como agua dulce. Pero todavia nos encontramos con el problema de devolucion al medio ambiente de una salmuera con alto contenido en sales.

La cantidad mínima de energia necesaria para desalar puede obtenerse por lo tanto siguiendo el camino inverso del proceso de desalación, midiendo la energía que se desprende en la disolución de sales en agua pura, y puede representarse por la fórmula: $W_{min} = a \ln(T^*R^*W)$ donde W_{min} es la energía desprendida en el proceso de mezcla (kWh/m³), R es la constante universal de los gases ($R=0.082 \text{ atm} \cdot \text{l/K} \cdot \text{mol}$), T es la temperatura absoluta de la mezcla ($T = \text{Temperatura} (^{\circ}\text{C}) + 273.15$), y aW es la actividad de los electrolitos que componen la disolución salina, de valor cercano a la unidad para aguas marinas. Como la actividad depende fuertemente de la concentración de los electrolitos (es directamente proporcional a la molalidad de los constituyentes tanto iónicos como no iónicos), la energía mínima desprendida en el proceso y por lo tanto la necesaria para desalar depende de la concentración del agua de aporte: para un agua bruta media del mar de 35.000 ppm de total de sólidos disueltos, dicha energía a 25° C es de 0.88 kWh/m³, pero baja hasta los 0.3 kWh/m³ en el caso de una concentración de 15.000 ppm. En condiciones de equilibrio el precio llegaria a ser de 7 pts/m³ pero el proceso seria extremadamente lento y debido a roces, fricciones, variaciones del flujo de calor, etc, el proceso se encarece hasta unas cinco veces mas que el precio teorico.

• **Los principales procesos que existen de desalacion en la actualidad son los siguientes:**

Separacion	Energia	Proceso	Metodo
Agua de sales	Termica	Evaporacion	Destilacion subita (Flash)
			Destilacion multiefecto
			Termocompresion de vapor
		Cristalizacion	Destilacion solar
			Congelacion
			Formacion de hidratos
			Destilacion con membranas
Sales de agua	Electrica	Evaporacion	Compresion mecanica vapor
		Filtracion	Osmosis Inversa
		Filtracion selectiva	Electrodialisis

	Química	Intercambio	Intercambio ionico
--	---------	-------------	--------------------

• **Destilación súbita por efecto flash (MSF).**

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para conseguir vapor que no contiene sales (éstas son volátiles a partir de 300° C): el vapor se condensa posteriormente en el interior ó exterior de los tubos de la instalación. Los sistemas desaladores suelen funcionar por debajo de la presión atmosférica, por lo que necesitan un sistema de vacío (bombas ó eyectores), además de extracción del aire y gases no condensables. La utilización de una cámara flash permite una evaporación súbita (y por lo tanto de carácter irreversible) previa a su posterior condensación. Generalmente, la cámara flash se sitúa en la parte baja de un condensador de dicho vapor generado en la cámara inferior. Por lo tanto, la recuperación de calor necesario para la evaporación se obtiene gracias a la unión sucesiva de etapas en cascada a diferente presión, y es necesario el aporte mínimo de la condensación de un vapor de baja o media calidad proveniente de una planta de generación eléctrica. Este es el proceso evaporativo más ampliamente utilizado en el mundo, de implantación masiva sobre todo en Oriente Medio. Ello se debe a varias razones:

Es especialmente válido cuando la calidad del agua bruta no es buena (alta salinidad, temperatura y contaminación del agua aportada).

Su acoplamiento con plantas de potencia para formar sistemas de cogeneración es muy fácil y permite una gran variabilidad de rangos de operación en ambas plantas.

Su robustez en la operación diaria frente a otros procesos de destilación es notoria.

La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación. Sin embargo, las plantas MSF tienen un grave inconveniente. Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir 1 m³ de agua desalada, es de los más altos de los procesos estudiados. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta. Además de su alto coste de operación, su coste de instalación no es más bajo que otros procesos de desalación.

• **Destilación por múltiple efecto (MED).**

Al contrario que en el proceso MSF por efecto flash, en la destilación por múltiple efecto (MED) la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo. Una planta MED (Multi-Effect Distillation) tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, dichos efectos sucesivos tienen cada vez un punto de ebullición más bajo por el efectos de dicha presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto. El agua salada se transfiere luego al efecto siguiente para sufrir una evaporación y el ciclo se repite, utilizando el vapor generado en cada efecto. Normalmente también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa al siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación. La primera etapa se nutre de vapor externo de un sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (ó extracción de una de condensación). Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema. Por lo tanto las plantas MED también conforman sistemas de cogeneración al igual que las MSF consumiendo una porción de energía destinada a la producción eléctrica. La destilación por múltiple efecto no es un proceso solamente utilizado para la desalación. La capacidad de este tipo de plantas suele ser más reducida que las MSF (nunca suele superar los 15.000 m³/día) aunque ello se debe mas a razones de índole política que operativa: las MSF más grandes se instalan en Oriente Medio y las mayores MED están instaladas en las islas del Caribe para abastecer de agua estas

zonas de gran presión turística. También es verdad que el número máximo de efectos conectados en serie raramente es mayor de 15, a excepción de las MED con múltiples efectos integrados en cada uno de ellos, llegando en este caso a un número total de más de 50. Sin embargo, tienen un mejor rendimiento global con respecto a una MSF: el ratio de ganancia en los destiladores de este tipo de plantas puede llegar a 15 sin ningún problema, reduciendo por lo tanto el consumo específico de este proceso respecto de una planta MSF con idénticas capacidades. Ello se debe principalmente a la irreversibilidad asociada al proceso de separación flash que aparece en los procesos MSF. Además el consumo eléctrico es menor que la MSF ya que necesita menos bombas de circulación al no existir recirculación de salmuera.

- **Compresión térmica de vapor (TVC)**

La compresión térmica de vapor (TVC, Thermal Vapor Compression) obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto (MED), pero utiliza una fuente de energía térmica diferente: son los llamados compresores térmicos (o termocompresores), que consumen vapor de media presión proveniente de la planta de producción eléctrica (si tenemos una planta dual, sino sería de un vapor de proceso obtenido expresamente para ello) y que succiona parte del vapor generado en la última etapa a muy baja presión, comprimiéndose y dando lugar a un vapor de presión intermedia a las anteriores adecuado para aportarse a la 1ª etapa, que es la única que consume energía en el proceso. El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. Muchas veces se las considera el mismo proceso, pero aquí se tratarán individualmente ya que el consumo de energía de la planta se realiza por un equipo diferente.

- **Destilación solar.**

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. A pesar de tener un coste energético nulo y escasa inversión necesaria, su baja rentabilidad reside en su escasa producción por metro cuadrado de colector al destilarse tan sólo unos litros al día en el caso de condiciones climatológicas favorables. Por lo tanto no se han desarrollado a gran escala en lugares con un consumo elevado de agua dulce. El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un cristal transparente, en cuyo fondo tenemos agua salada en reposo. Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua salada se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera. Aunque pueden utilizarse técnicas de concentración de los rayos solares apoyándose en lentes ó espejos (parabólicos ó lisos), no suelen compensar las mayores pérdidas de calor que ello acarrea y su mayor coste económico.

Pero la energía solar también puede ser la fuente de energía de un proceso de destilación, incluso de producción eléctrica para pequeñas instalaciones de ósmosis inversa. Por ejemplo, el uso de colectores de concentración parabólicos puede usarse en procesos MSF ó MED dependiendo del coste de los colectores, que son los que determinan la producción de agua por metro cuadrado (de media producen 10 m³ de agua dulce por m² de colector) y factores climáticos tales como el porcentaje del día en que la planta consume energía solar.

- **Congelación.**

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener un agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso muy sencillo tiene problemas de adaptación para su implantación a escala industrial, ya que el aislamiento térmico para mantener el frío y los mecanismos para la separación de los cristales de hielo deben mejorarse, así como adaptar la tecnología a intercambiadores de frío. El proceso de congelación es un

fenómeno natural que se contempla con mucha facilidad en nuestro Planeta, alrededor del 70% del agua dulce está contenida en los polos terrestres. La utilización de hielo de los polos para el consumo humano es muy poco conveniente para la conservación del equilibrio térmico del Planeta.

- **Formación de hidratos.**

Es otro método basado en el principio de la cristalización, que consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. Al igual que el anterior proceso, su rendimiento energético es mayor que los de destilación, pero conlleva una gran dificultad tecnológica a resolver en cuanto a la separación y el lavado de los cristales que impiden su aplicación industrial.

- **Destilación por membranas.**

Es un proceso combinado de evaporación y filtración. El agua salada bruta se calienta para mejorar la producción de vapor, que se expone a una membrana que permite el paso de vapor pero no del agua (membrana hidrófoba). Después de atravesar la membrana el vapor se condensa, sobre una superficie más fría, para producir agua desalada. En estado líquido, esta agua no puede retroceder atravesando la membrana por lo que es recogida y conducida hacia la salida.

- **Compresión mecánica de vapor (CV).**

En la compresión mecánica de vapor (CV) evapora un líquido, en este caso el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda mantenerse el ciclo de destilación de agua salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura. Simplificando todos los elementos auxiliares podemos ver que el vapor interior de los tubos es comprimido a presión atmosférica en torno a 0.2 bares en un compresor volumétrico especial para trasegar vapor. El vapor ligeramente sobrecalentado se condensa en el exterior de los tubos del intercambiador, siendo recogido por una bomba en su parte inferior. Como puede observarse, si el proceso fuera ideal sólo deberíamos vencer la elevación del punto de ebullición del agua salada para mantener el proceso, aunque no es posible realmente; en todo caso el consumo específico de estas instalaciones es el más bajo de los procesos de destilación: normalmente el consumo eléctrico equivalente está sobre los 10 kWh/m³ (la mitad que una planta MSF).

Aunque su consumo específico es con mucho el menor de las instalaciones de destilación, tiene un gran inconveniente: la inexistencia de compresores volumétricos de vapor de baja presión de tamaño suficiente para una producción considerable. Así no se conocen unidades CV mayores de 5.000 m³/día, y estos compresores sólo permiten un máximo de 3 etapas a diferentes presiones conectadas en cascada. Normalmente existen intercambiadores de precalentamiento del agua de aporte con el destilado y la salmuera tirada al mar (como el número de etapas es reducido hay que recuperar la energía de salida de la salmuera), ayudados por una resistencia eléctrica en los arranques, así como todos los dispositivos de tratamiento de agua anteriores y posteriores al proceso de destilación.

- **Osmosis inversa**

La ósmosis es un proceso natural que ocurre en plantas y animales. De forma esquemática se puede decir que cuando dos soluciones con diferentes concentraciones se unen a través de una membrana, existe una circulación natural de la solución menos concentrada para igualar las concentraciones finales, con lo que la diferencia de altura obtenida se traduce en una diferencia de presión, llamada osmótica.

Sin embargo aplicando una presión externa que sea mayor a la presión osmótica de una disolución respecto de otra, el proceso se puede invertir, haciendo circular agua de la disolución más concentrada y purificando la

zona con menor concentración, obteniendo finalmente un agua de pureza admisible, aunque no comparable a la de procesos de destilación. Por eso es altamente recomendable para la filtración de aguas salobres, en las que la sal a rechazar es mucho menor que en aguas marinas. La cantidad de permeado depende de la diferencia de presiones aplicada a la membrana, sus propiedades y la concentración del agua bruta, y la calidad del agua permeada suele estar en torno a los 300–500 ppm de total de sólidos disueltos, cifra un orden de magnitud mayor al agua obtenida en un proceso de evaporación.

Una membrana para realizar ósmosis inversa debe resistir presiones mucho mayores a la diferencia de presiones osmóticas de ambas soluciones. Por ejemplo un agua bruta de 35.000 ppm de total de sólidos disueltos a 25°C tiene una presión osmótica de alrededor de 25 bar, pero son necesarios 70 bar para obtener permeado). Además debe ser permeable al agua para permitir el flujo y rechazar un porcentaje elevado de sales. Sin embargo no se puede considerar la OI como un proceso de filtración normal, ya que la dirección de flujo del agua bruta es paralela y no perpendicular como un caso cualquiera de filtración. Ello implica que tan sólo una parte del agua bruta de alimentación pasa realmente a través de la membrana (un proceso de filtración lo haría en su totalidad), y que no se acumulen sales en la membrana al arrastrarse por el agua bruta que no pasa por la membrana. El proceso de ósmosis inversa es tan simple que a priori solo son necesarias las membranas que filtren el contenido salino y el equipo presurizador. Pero una planta de OI es mucho más compleja que una agrupación de módulos y una o varias bombas, por ejemplo las membranas se ensucian muy fácilmente con la operación continuada y necesita un pretatamiento intensivo (mucho mayor que en los procesos de destilación), que comprende entre otros:

Clorado para reducir la carga orgánica y bacteriológica del agua bruta.

Filtración con arena para reducir la turbidez.

Acidificación para reducir el pH y limitar la formación de depósitos calcáreos.

Inhibición con polifosfatos de la formación de sulfatos de calcio y bario.

Declorado para eliminar el cloro residual.

Cartuchos de filtrado de partículas requeridos por los fabricantes de membranas.

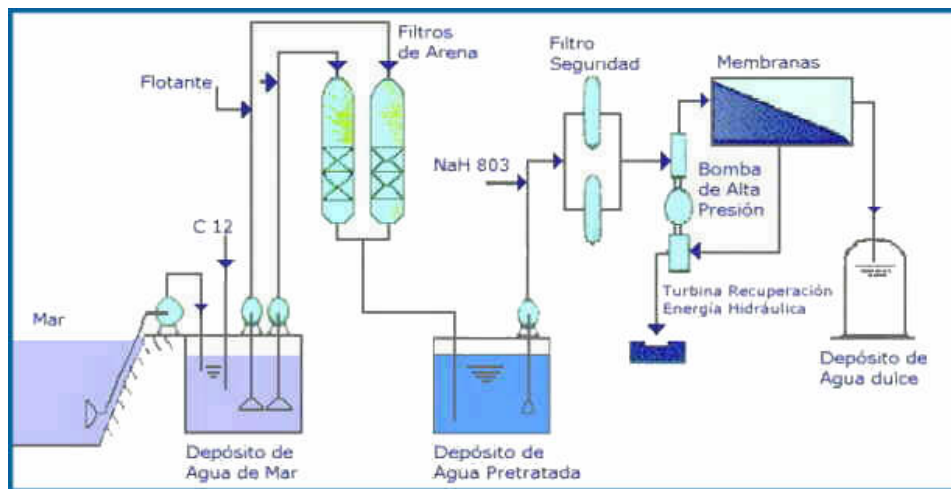
Microfiltración (MF) y ultrafiltración (UF) en el caso de aplicaciones industriales muy específicas ó en reutilización de aguas residuales.

Las etapas del pretratamiento son las siguientes:

Bombeo de agua de aporte, Dosificación de ácido clorhídrico, Dosificación de hipoclorito sódico, Dosificación de reactivo antiincrustante, Filtración sobre lecho de sílex, Filtración de seguridad sobre cartuchos, Dosificación de reactivo reductor, Tratamiento por ósmosis inversa, Bombeo de alta presión, Módulos de ósmosis inversa, Equipo de limpieza de membranas y flushing.

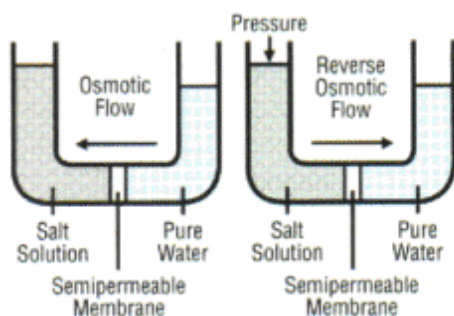
Y las del post – tratamiento:

Dosificación de hipoclorito sódico, Reendurecimiento, Acumulación y bombeo de agua producto.



El proceso es el siguiente:

El agua del mar pasa a través de los muros tras lo cual las bombas de transferencia incrementan la presión en el con lo que puede pasar al pretratamiento. En el pretratamiento los sólidos son removidos y un desinfectante es inyectado para prevenir la actividad microbiológica en las tuberías y en el sistema. Acidificarlo también es necesario corriente arriba de la unidad filtradora. El proceso de coagulación es ayudado por coagulaciones sucesivas en el agua acidificada, posteriormente los microfoculos que se han formado se retiran por un filtro multitamaño. Los filtros se hallan divididos en compartimentos independientes, los cuales consisten en múltiples capas con diferentes tamaños de poro. Siendo cada filtro purgado o cambiado periódicamente según la carrera que tenga. Dicha limpieza se hace pasando aire desde el fondo hacia la parte superior del efluente que será descargado en el mar. También un agente desclorante es inyectado en el agua para eliminar el desinfectante. Cerca de un cincuenta por ciento del agua tratada es convertida en permeable la cual es bombeada a través de la membrana a una presión suficiente para que pase a través de ella. El concentrado que posteriormente queda es descargado al mar, pudiéndose recuperar energía a través de una turbina con lo cual el consumo será inferior al 35%. Además un limo puede ser añadido al tanque del agua para alterar el valor del pH. Por otra parte la capacidad de almacenamiento puede prevenir las fluctuaciones en el abastecimiento mediante bombeo.



La concentración hidrostática final representa la aparente presión osmótica que brinca la solución la cual varía con la temperatura. Si la presión externa es mayor que la presión osmótica aplicada, la osmosis inversa tendrá lugar. Por lo cual el ratio de penetración del sal a través de la membrana será proporcional a la diferencia entre ambas presiones. Si esta presión se incrementa el nivel del agua dulce se incrementará mientras que la del agua salada permanecerá constante. Las redes de operación bajo presión en la osmosis inversa requieren proporcionar un agua económica, típicamente mayor que 20 bar. Mientras que la presión osmótica del agua salada está entre los 34–43 bar, las operaciones están en un rango de entre 54 y 80 bar.

Las razones de su imposición con respecto a otras tecnologías son las siguientes:

El consumo eléctrico específico de una instalación de ósmosis inversa es el menor de los estudiados hasta ahora ($6-8 \text{ kWh/m}^3$), pero se puede aprovechar la energía contenida en la salmuera rechazada a alta presión para rebajar esa cifra hasta por debajo de 3 kWh/m^3 . Ello supone un coste económico menor de 25 ptas/ m^3 , considerando un coste de la electricidad de 8 ptas/kWh.

Al ser un proceso de filtración, el coste energético depende de la concentración del agua bruta, cosa que no ocurre en las tecnologías de evaporación.

Permite una adaptabilidad mayor que otras plantas a una ampliación de su capacidad si la demanda es creciente en la zona.

Los costes de inversión de una instalación de OI están por debajo de otras tecnologías de destilación.

Sin embargo, las limitaciones tecnológicas asociadas a las membranas con algunos tipos de aguas marinas impide su implantación total en el resto del mundo.

Control del ensuciamiento de los sistemas de osmosis inversa:

El ensuciamiento mineral y orgánico de las membranas representa el mayor problema operacional de los sistemas de ósmosis inversa. Las técnicas comunes de pretratamiento del agua de alimentación, consistentes en filtración, suavización y adición de reactivos químicos son costosas y de efectos limitados.

Se describen sistemas anti-ensuciamiento basados en un diseño único de capacitancia de alto voltaje los cuales han sido usados desde 1994 para evitar el ensuciamiento mineral y orgánico de superficies de transferencia de calor en sistemas acuosos y de procesos industriales.

La electro-tecnología aplicada como pretratamiento al agua de alimentación de ósmosis inversa es efectiva y eficaz en eliminar y evitar el ensuciamiento de las membranas. En comparación con los principios conocidos de la metodología de la dispersión electrostática de coloides con las teorías aceptadas del ensuciamiento de las membranas por los mismos, revela un alto nivel de correlación teórica y práctica entre ambas. Los resultados que se presentan en este trabajo fueron tomados del desempeño y datos de la operación de tres diferentes sistemas de ósmosis inversa en los que esta tecnología descrita fue utilizada.

Ensuciamiento coloidal de las membranas en los cuales se incluyen partículas minerales y biológicas encontradas en todas las aguas crudas de todas las fuentes. Los coloides varían en tamaños desde unos cuantos nanómetros a unos cuantas micras, e incluyen una amplia variedad de ambos componentes minerales y orgánicos, tales como arcillas minerales, sílice coloidal, óxidos de hierro, aluminio y manganeso, diversos tipos de micro organismos, virus, biocoloides, fibrilados, coloides húmicos, y aglomerados de exudados y materia orgánica macromolecular.

El modelo de la teoría de la capa doble explica las fuerzas repulsivas entre los coloides. Está enfocada en el efecto que los coloides negativamente cargados tienen sobre los iones positivos en el seno de la solución. Los iones positivos forman una capa firmemente adherida alrededor de la superficie del coloide. Los iones positivos adicionales atraídos por las partículas negativamente cargadas confrontan una fuerza repulsiva de los contra-iones adheridos en la capa, y de los otros contra-iones aproximándose al coloide. La densidad de esta capa, conocida como la capa difusa, gradualmente disminuye con la distancia de la partícula coloidal, hasta que alcanza el equilibrio con el resto de los iones en la solución. Es la capa difusa rodeando al coloide la que crea la mayor fuerza repulsiva entre las partículas coloidales: a mayor densidad de la capa difusa, mayor será la distancia en la que las fuerzas repulsivas son significativas.

La función primordial de la capa doble es neutralizar al coloide negativamente cargado. Esto crea el potencial electrocinético entre la superficie del coloide y cualquier punto en el seno del líquido. Este potencial

(típicamente en el orden de los milivolts) se conoce como Potencial Zeta.

Cuando la densidad de carga superficial en las partículas coloidales es lo suficientemente baja, o cuando el contenido electrolítico de la solución es elevado, las fuerzas de Van der Waals logran sobre imponerse a las fuerzas de dispersión, y el resultado obtenido es el del proceso de floculación. Esta unión de partículas es lo que se desea lograr durante los procesos de clarificación en el tratamiento de aguas mediante la sedimentación de sólidos suspendidos.

Este efecto de floculación generalmente se obtiene mediante la adición de electrolitos (eg: sales de aluminio o fierro) a soluciones acuosas para reducir el potencial zeta de las partículas. Sin embargo, cuando la resultante entre las dos fuerzas es positiva, el efecto resultante será el de un estado estable de dispersión. De esta manera, al aumentar el potencial zeta de las partículas, se logra obtener un estado de dispersión más estable.

El ensuciamiento coloidal de membranas de OI es el resultante de que la repulsión de la capa doble el cual se invalida por el arrastre del flujo del permeado a través de la membrana. Este es una fuerza hidrodinámica proporcional al flujo del permeado, actuando perpendicular a la superficie de la membrana.

La dispersión electrostática de los coloides ha sido sugerida por muchos autores como un medio de mantener las membranas de OI libres de ensuciamiento coloidal. Sin embargo, todos los intentos de incrementar su carga superficial con la adición de reactivos químicos dispersantes ha tenido efectos limitados.

Desalinización por osmosis inversa aprovechando la hidro-energía para co-generación:

La mayoría de los países en el medio oriente presentan deficits de agua. En ellos se consume cada gota de agua disponible en los ríos y acuíferos subterráneos y rápidamente están agotando el agua subterránea que únicamente se puede usar una sola vez. El desarrollo no convencional de los recursos hidráulicos y de la energía, incluyendo la desalinización de agua de mar y salobre por métodos de co-generación, será punto clave en la planeación de los recursos hidráulicos en países áridos y semi áridos para el siglo XXI. El uso de la potencia hidráulica y solar para desalinización por osmosis inversa, que es un nuevo tipo de cogeneración que puede ser ampliamente utilizada en el futuro, pero será seguramente el desarrollo tecnológico clave en esas regiones para alcanzar los objetivos, los cuales están enfocados a valorar los energéticos fósiles y el medio ambiente.

• **Electrodialisis (ED).**

Este proceso permite la desmineralización de aguas salobres haciendo que los iones de diferente signo se muevan hacia zonas diferentes aplicando campos eléctricos con diferencias de potencial aplicados sobre electrodos, y utilizando membranas selectivas que permitan sólo el paso de los iones en una solución electrolítica como es el agua salada. Los iones van a los compartimentos atraídos por los electrodos del signo contrario, dejando en cubas paralelas el agua pura y en el resto el agua salada más concentrada. Es un proceso que sólo puede separar sustancias que están ionizadas y por lo tanto su utilidad y rentabilidad está sólo especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres ó reutilización de aguas residuales, con un consumo específico y de mantenimiento comparable en muchos casos a la ósmosis inversa. En algunas ocasiones, la polaridad de los ánodos y cátodos se invierte alternativamente para evitar el ensuciamiento de las membranas selectivas al paso de dichos iones. En este caso se habla de electrodialisis reversible (EDR).

• **Intercambio iónico**

Las resinas de intercambio iónico son sustancias insolubles, que cuentan con la propiedad de que intercambian iones con la sal disuelta si se ponen en contacto. Hay dos tipos de resinas: aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones OH⁻ (permutación básica), y resinas catiónicas que sustituyen cationes por iones H⁺ (permutación ácida). La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la

concentración de sal es menor de 1 gr/l. Por lo tanto se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamiento de afino. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un coste difícilmente asumible para aguas de mar y aguas salobres.

• Resumen de las tecnologías utilizadas en desalacion

Tras la comparacion de los tratamientos de desalacion actualmente existentes, encontramos solo algunos procesos tecnológicamente viables actualmente a escala industrial: Evaporación súbita por efecto flash, destilación múltiple efecto, termocompresión de vapor y compresión de vapor mecánica, ósmosis inversa y electrodiálisis.

Características	MSF	MED-TVC	CV	OI	ED
Tipo energia	termica	termica	electronica	electronica	electronica
Consumo energetico primario (Kj/Kg)	alto (>200)	alto/medio (150-200)	medio (100-150)	bajo (<80)	bajo (<30)
Coste instalaciones	alto	alto/medio	alto	medio	medio
Capacidad produccion (m ³ /dia)	alta (>50000)	media (<20000)	baja (<5000)	alta (>50000)	media (<30000)
Posibilidad ampliacion	dificil	dificil	dificil	facil	facil
Fiabilidad de operacion	alta	media	baja	alta	alta
Desalacion agua de mar	si	si	si	si	no
Calidad agua desalada (ppm)	alta (<50)	alta (<50)	alta (<50)	media (300-500)	media (<300)
Superficie terreno requerida de instalacion	mucha	media	poca	poca	poca

• Situacion actual de la desalacion

La capacidad total instalada en todo el mundo es de unos 26 hm³ /día, de los cuales 14 hm³ /día corresponden a agua de mar y 12 hm³ /día a aguas salobres. El peso de Oriente Medio es muy importante todavía en la industria de la desalación: el 61% del total de aguas desaladas. Arabia Saudita es el primer país en cuanto a capacidad desaladora (24,4%), seguido de cerca por los Emiratos Árabes unidos. España es actualmente el noveno país tras siete países árabes, USA, y la antigua URSS. Si hablamos del número de unidades instaladas, el primer lugar lo ocupa los Estados Unidos, ya que tienen plantas de pequeño tamaño en comparación con las plantas de Oriente Medio, y Arabia Saudita ocupa el segundo lugar. España está en el quinto lugar, ello significa que el tamaño medio de las instalaciones españolas es pequeño en comparación a la media mundial. En cuanto a tecnologías, las de destilación suponen el 52%, las de ósmosis inversa son el 38%, y el resto (12%) es principalmente debido a la electrodiálisis.

• La desalación en España

Se entiende que la tecnología mas favorable para la utilizacion en España es la de osmosis inversa, en base a su mejor precion de obtencion de agua, la factible ampliacion de las plantas y su gran fiabilidad. Tan sólo la calidad del agua es peor que el resto de tecnologías, si no se contempla la posibilidad de añadir un segundo

paso para reducir esa concentración salina residual tras un único paso por las membranas.

Puesto que el consumo energético primario en una planta que consume electricidad no tiene racionalidad, es necesario suponer un rendimiento a la planta generadora de electricidad que nos proporcione el consumo necesario (alrededor de un 30% para grandes centrales térmicas).

Aunque la dotación por habitante y año supera con creces el límite considerado como el mínimo que impida el desarrollo de la sociedad asentada en el territorio ($2.775 \text{ m}^3/\text{hab. Y año}$), el grave desequilibrio entre los recursos entre regiones y los consumos soportados en ciertas zonas con agricultura intensiva de regadío e infraestructura turística que además consume en la época de menores precipitaciones, justifica la instalación de plantas desaladoras. La desalación en España queda afortunadamente reducida al Levante Español, Murcia, Andalucía, los dos archipiélagos y las ciudades del Norte de África. En dichas zonas, se puede evaluar la demanda total urbana asociada al turismo como una población equivalente de 7 millones de personas, que supone el 20% del total. La producción total de agua desalada a finales del año 1998 se cifra en $222 \text{ Hm}^3/\text{año}$, de los cuales alrededor del 42% corresponden a aguas marinas, y el 58% a salobres. Ello supone alrededor de un 4,9% del consumo total para abastecimiento urbano (alrededor de 2 millones de personas), y un 0,7% de todos los usos consuntivos del agua. En cuanto a la capacidad total instalada, actualmente sobrepasa los $700.000 \text{ m}^3/\text{día}$. También se observa que en España la desalación de agua salobre para la agricultura intensiva de regadío se ha extendido considerablemente a pesar del sobre costo producido por el proceso de desalación con respecto a la obtención por otros métodos o de forma natural. Puede decirse que prácticamente es nuestro país el único que realmente consume aguas desaladas para su utilización agrícola (un 29,55% del total), aunque haya países que si utilizan aguas desaladas para el riego de jardines, ante la imposibilidad de otras. La rentabilidad obtenida por cierto tipo de cultivos no ha sido el freno para seguir con ellos, teniendo en cuenta además que el coste de aguas salobres desaladas es bastante inferior al del agua de mar. Las islas Canarias han recurrido a la desalación para obtener la mayor parte del agua que demanda principalmente la industria turística. A partir de los setenta, la sobreexplotación de los escasos recursos acuíferos de las islas estaba llegando a límites preocupantes, ello ha supuesto que islas prácticamente desérticas como Lanzarote (140 mm . de precipitación anual) y Fuerteventura se abastezcan sólo con agua desalada, y en el caso de Gran Canaria llegue al 80% del total. El resultado de todo ello es que en las Canarias 1 millón de personas se abastecen de las 280 plantas desaladoras existentes, con una capacidad de $350.000 \text{ m}^3/\text{día}$.

• **Resumen**

En resumen, la instalación de plantas desaladoras en España se plantea como solución en áreas localizadas (hasta ahora la capacidad instalada en la mayoría de ellas no es muy grande), cosa que no ocurre en otras zonas de alto déficit estructural como Oriente Medio, donde se instalan grandes plantas en zonas aisladas de los asentamientos urbanos y se construyen grandes tuberías para su transporte. España es el país europeo más puntero en tecnologías de desalación por ósmosis inversa (de ello su masiva implantación en nuestro país), pero no en tecnologías evaporativas, donde grandes compañías alemanas e italianas, junto con las de Extremo Oriente copan el mercado en Oriente Medio.

• **Problemática medioambiental de los vertidos de salmuera.**

En todo proceso desalador, tenemos una porción del agua previamente introducida que es rechazada y devuelta normalmente al reservorio original de donde se aportó el agua bruta a desalar. Si hablamos de aguas desaladas una media de 45.000 ppm de sólidos disueltos, la salmuera rechazada devuelta al mar en plantas MSF suele tener una concentración de $60\text{--}65.000 \text{ ppm}$ y un caudal menor de la mitad que el aportado, teniendo en cuenta que tan sólo la décima parte del agua bruta introducida se desala y que existe recirculación del agua bruta. El resto de caudal que equilibra el balance de masa de la instalación es el agua bruta precalentada en la sección de rechazo que no es concentrada respecto a la inicial.

La Inyección en Sondeos Profundos es una alternativa altamente fiable, tanto desde el punto de vista operativo como desde el punto de vista de seguridad ambiental, para la gestión de la salmuera de rechazo de las plantas desalinizadoras.

La salmuera considerada como residuo a gestionar puede generarse en diversos procesos industriales, tales como la obtención de sales, la minería de disolución, la extractiva de petróleo o gas y la desalinización de aguas salobres. La cual esta en amplio desarrollo dada la gran cantidad de estas operaciones que se está llevando a cabo. No obstante el método de la Inyección en Sondeos Profundos es aplicable a la salmuera, cualquiera que sea su procedencia así como una amplia gama de residuos líquidos.

Uno de los problemas más determinantes de la viabilidad de una operación de ósmosis inversa es la gestión del rechazo de salmuera.

En gran número de ocasiones el rechazo se vierte al mar, si se encuentra próximo, lo cual no es siempre el así. Por otra parte este vertido al mar encuentra a veces la contestación de algunos sectores de la sociedad. El rechazo contiene, no solo las sales del agua bruta, ya sean naturales o generadas en algún proceso de contaminación (por ejemplo los nitratos), también todo aquel compuesto que se utilice como aditivo en el proceso de ósmosis.

El sistema ideal para la eliminación de residuos sería aquel que admitiera una cantidad ilimitada del mismo y lo mantuviera siempre fuera del campo de la actividad humana. Para que una operación de Inyección Profunda sea factible se han de dar cuatro condiciones:

- Existe una formación permeable capaz de admitir el residuo (permeable y transmisiva).
- Existe una formación impermeable que mantiene el residuo confinado el tiempo suficiente hasta su inocuidad.
- Las condiciones de ambas formaciones no cambian con el desarrollo de la operación.
- La operación de Sondeos de Inyección Profunda no interfiere a otros recursos más importantes.

La Inyección Profunda plantea problemas específicos que han de considerarse en todo momento. Para abordarlos se definen dos conceptos:

- Inyectividad, relacionada con la roca almacén, define su aptitud para recibir fluidos inyectados.
- Inyectabilidad, relacionada con el fluido a inyectar, define su comportamiento y compatibilidad con la roca y con el fluido almacén.

El fluido que rellena los huecos de la formación almacén, generalmente agua salada, está en un equilibrio físico-químico con la roca almacén casi perfecto, alcanzado a través de millones de años. Nosotros pretendemos introducir un fluido extraño que deshará este equilibrio y se producirán reacciones tendentes a su restablecimiento. Ello puede tener como consecuencia resultados no queridos, tales como precipitaciones que obturen la formación pudiendo hacer irrecuperable el sondeo.

El residuo ha de compatibilizarse con los materiales del sondeo, con la formación almacén y con el fluido contenido en ella. La variedad de los problemas de compatibilidad que pueden presentarse es muy amplia, especialmente los de naturaleza química. Con frecuencia son complejos y difíciles de detectar, dada la pequeña magnitud de sus efectos que pueden pasar desapercibidos, al nivel de control al que se les suele someter.

Generalmente, la inyección de residuos requiere la aplicación de una presión superior a la natural del fluido contenido en la formación. La distribución de presiones dentro del acuífero durante la operación, presenta su valor máximo en el sondeo y decrece al alejarse radialmente del mismo, de forma casi proporcional a la distancia. El exceso de presión necesario y su área de influencia dependen de las características del acuífero

receptor, de los fluidos nativos, de la cantidad de residuo inyectada y del tiempo necesario para la inyección. El empleo de presiones excesivas puede conducir a la fracturación hidráulica de la formación permeable, o a la migración de residuos hacia niveles más superficiales, a través del entorno más próximo al sondeo de inyección. Para una operación de inyección segura ha de conocerse cual es la mayor presión de inyección admisible.

Un descenso progresivo de pendiente hidráulica indica una pérdida de porosidad y permeabilidad en la formación inyectada, generalmente por colmatación. Asimismo, la evolución del índice de inyectividad puede revelar daños en el sondeo, drenaje del residuo hacia otros niveles u otras deficiencias surgidas durante la operación.

• **Bibliografía:**

Fariñas, M. Ed. McGraw Hill, Ósmosis Inversa. Fundamentos, tecnología y aplicaciones. 1999.

AEDyR (Asociación Española de Desalación y Reutilización).

CEDEX (Centro de Estudios y Experimentaciones del Ministerio de Fomento).

Metcalf-Eddy, Ingeniería Sanitaria, 1985.

La desalacion como alternativa al Plan Hidrológico Nacional, realizado por CIRCE y Universidad de Zaragoza, Enero 2001.

IDA (International Desalination Association). Pagina Web: <http://www.ida.bm>

La desalación de agua de mar por Ósmosis Inversa. Sanz, M. Caso práctico: I.D.A.M. de Bahía de Palma. I Congreso AEDyR, Murcia. (2000)

J.H. van't Hoff, The Role of Osmotic Pressure in the Analogy between Solutions and Gases, Zeitschrift für physikalische Chemie, vol 1, pp. 481–508 (1887)

Thermodynamics Research Laboratory, Pagina Web:
http://www.uic.edu/~mansoori/Thermodynamics.Educational.Sites_html

Thermodynamik – Wärmelehre, Pagina Web:

<http://didaktik.physik.uni-wuerzburg.de/~pkrahmer/home/thermo.html>

Ósmosis Reverse Ósmosis and Ósmotic Pressure what they are, Pagina Web: <http://urila.tripod.com/index.htm>

Vapor Pressure, Boiling and Freezing Temperatures of a Solution, Pagina Web:
<http://www.urila.tripod.com/colligative.htm>

IGME (1990). La Inyección de residuos líquidos. Una alternativa. Colección lucha contra la contaminación.

Michael B.Cook. (1989). SEMINARIO: La Inyección en Sondeos Profundos. Una alternativa en la lucha contra la contaminación (IGME).

Procesos de desalacion ESNE Tratamiento de Aguas

3º Medio Ambiente Pagina – 17 2001/2002