1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Definición de Desalinización

Desalinización se refiere al proceso de tratamiento de agua que remueve las sales de ella.[1]

1.1.1 Información general

Del agua total que existe en la tierra el 94% es salada y se encuentra en los océanos y el 6% restante es agua fresca. Del total de agua fresca el 27% se encuentra en los glaciares y el 72% es agua subterránea. A pesar de la gran importancia que tiene el agua de mar para la pesca y transporte, ésta es demasiado salada para sustentar la vida terrestre o la agricultura. Es por esto que a través de la historia, el hombre ha buscado incesantemente alternativas de potabilización del agua marina para utilizarla en diversos fines, ya sea para beber, agricultura, etc. Las técnicas de desalinización han incrementado el rango de los recursos hídricos disponibles para su uso en comunidades; los países más avanzados en estas tecnologías son los árabes por su ubicación geográfica y su poder adquisitivo.

1.2 Características del agua de mar

1.2.1 Características físicas y químicas del agua de mar.

El agua de mar tiene una gran variedad de materiales disueltos en ella; salinidad es la cantidad total de minerales que se encuentran en dicha agua, y ésta se mide en partes por millón. La salinidad promedio del océano es aproximadamente 35,000 ppm.

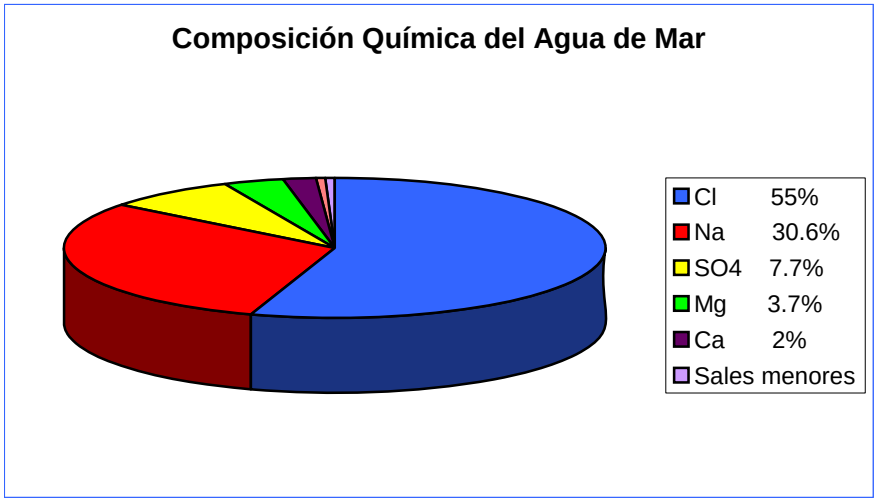


Figura 1: Composición química del agua de mar

Sólo seis elementos, comprenden el 99% de las sales marinas: cloro (Cl^-), sodio (Na^+), sulfato (SO_4^{-2}), magnesio (Mg^{+2}), calcio (Ca^{+2}), y potasio (K^+). Independientemente del océano que se trate, la concentración de sus sales mayoritarias permanece constante; solo varía la cantidad de agua en la mezcla por la diferencia entre océanos debido a las pérdidas y ganancias de agua fresca (evaporación y precipitación).[2]

1.2.2 Características físicas

Agua Marina	
Fase	Líquida
C_P *(kJ/kg.K)*	3.825
Densidad (kg/m3)	1020

Tabla 1. Características físicas del agua marina

1.3 Tecnologías de desalinización

A través de los años, se han desarrollado una gran variedad de tecnologías para la desalinización del agua, basados en su éxito comercial, éstas pueden ser clasificadas como procesos mayores (térmicos y de membrana) y menores como se muestra en la siguiente tabla:

Tipo de Proceso	**Proceso**
Térmico	Destilación Flash Multi-etapa Destilación Multi-Efecto Destilación por Compresión de Vapor Destilación a Baja Presión
Membrana	Electro diálisis Osmosis Inversa
Procesos-Menores	Congelamiento Humidificación Solar Destilación por Membrana

Tabla 2. Clasificación de las tecnologías de desalinización

Un dispositivo desalinizador separa esencialmente agua salada en dos corrientes: una con una baja concentración de sales disueltas (la corriente de agua fresca) y la otra contiene la salmuera (solución concentrada de sales). Estos equipos requieren energía para operar y pueden usar un gran número de diferentes tecnologías combinadas para lograr la separación.

1.3.1 Procesos térmicos

Aproximadamente la mitad de toda el agua fresca obtenida por desalinización es producida por procesos térmicos a través de la destilación del agua de mar. El proceso de destilación imita el proceso del ciclo natural del agua, en el que el agua salada de los océanos es calentada por el sol, produciendo vapor de agua que después es condensado en tierra en forma de agua dulce.

1.3.1.1 Destilación flash multi-etapa (MSF)

En este proceso, el agua salada es calentada en un recipiente llamado calentador de salmuera. La corriente de entrada del agua de mar, se introduce al proceso a través de unos tubos donde

es calentada, esta corriente pasa a otra etapa donde la presión atmosférica es menor, haciendo que el agua hierva inmediatamente.[3]

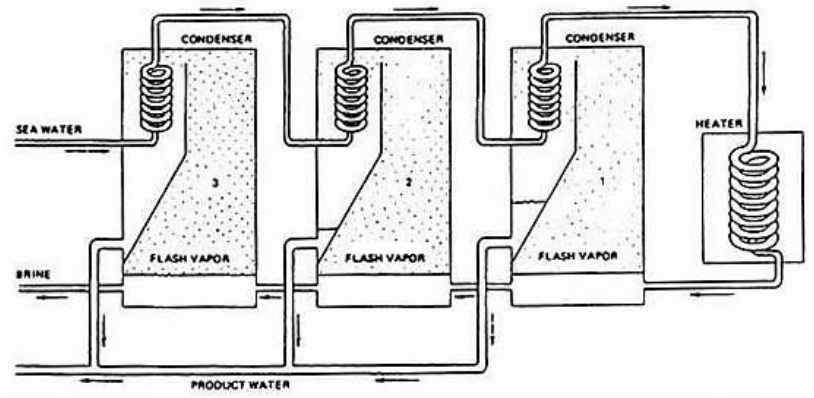


Figura 2: Esquema del funcionamiento de un destilador flash-multi etapa

1.3.1.2 Destilación multi-efecto (MED)

En general, un efecto consiste en un contenedor, un intercambiador de calor y dispositivos para transportar los fluidos entre estos contenedores. Este proceso tiene lugar en una serie de efectos y utiliza los principios de condensación y evaporación a una presión más baja en cada efecto sucesivo. Esto permite al agua salada hervir sin la necesidad de añadir calor adicional al que se suministró en el primer etapa.[4]

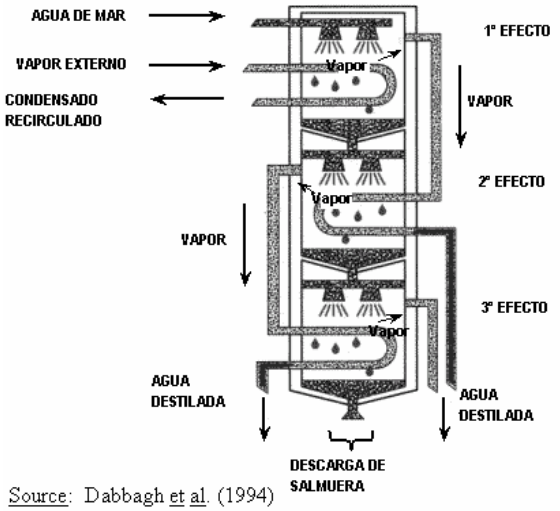


Figura 3: Esquema del funcionamiento de un equipo de destilación multi-efecto

1.3.1.3 Destilación de vapor comprimido (VC)

Esta tecnología generalmente se utiliza en combinación con otros procesos, cuando se utiliza por si mismo es sólo en los casos de aplicaciones a pequeña y mediana escala. El calor para la evaporación proviene de la compresión de vapor en vez de un intercambiador de calor donde el calor lo cede una corriente de vapor producida en una caldera. En el ciclo de compresión se utiliza un eyector de vapor y eyectores mecánicos para llevar a cabo la compresión. El vapor es removido del último efecto por un compresor y éste lo introduce como la corriente caliente al primer efecto después de la compresión donde se condensa en la superficie de la corriente fría del intercambiador de calor. [5]

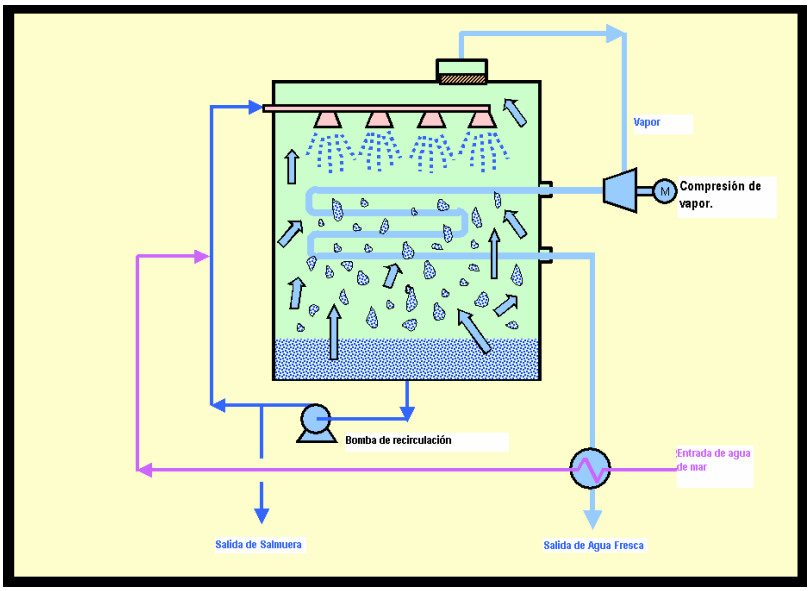


Figura 4: Esquema de destilación de vapor comprimido

1.3.1.4 Evaporación a baja presión (EBP)

La evaporación a baja presión, se realiza mediante un equipo que consta de dos tanques unidos mediante un tubo condensador, uno de los tanques (donde se encuentra el agua destilada), tiene una recirculación con un *tubo Venturi* acoplado para el flujo de agua logre realizar una caída de presión significativa sobre el tanque donde se encuentra el agua salada. La presión baja a la que se encontrará dicho tanque servirá para que la temperatura de saturación del agua disminuya y logre evaporarse con un bajo suministro de energía. La caída de presión debe ser suficientemente baja para disminuir la temperatura de saturación, así la evaporación se lleva a cabo a una menor temperatura que a presión atmosférica. El vapor saliente del tanque a baja presión entra a la unidad de condensación, hasta que alcanza el segundo tanque donde se recupera el agua fresca que se mantiene a presión atmosférica.

Sin embargo, este proceso no es 100% eficiente, los siguientes factores deben ser considerados para operar el equipo:

- Tener un intercambiador de calor eficiente.
- Incrustación
- Tener suficiente energía para alcanzar la temperatura de saturación para la presión indicada
- Obtener la caída de presión requerida
- El punto de ebullición se elevará conforme la concentración de sales en la salmuera se eleve.

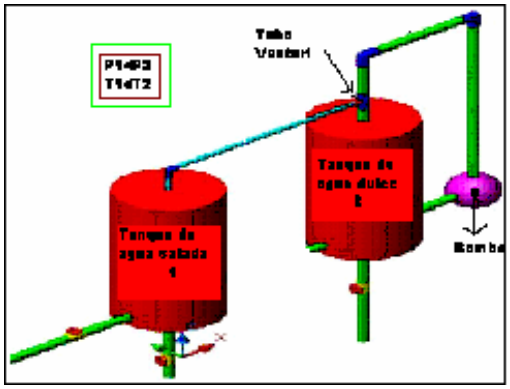


Figura 5. Diagrama del equipo desalinizador a baja presión

La caída de presión en este tipo de evaporación se puede llevar a cabo de varias maneras, un ejemplo de ellas es: mediante el acoplamiento de tubos Venturi, o bombas de vacío.

1.3.1.4.1. Tubo de Venturi

El *Tubo de Venturi* es un dispositivo que origina una caída de presión, al pasar por él un fluido, que se utiliza para hacer vacío en uno de los tanques y poder destilar a baja presión aplicando menos energía.

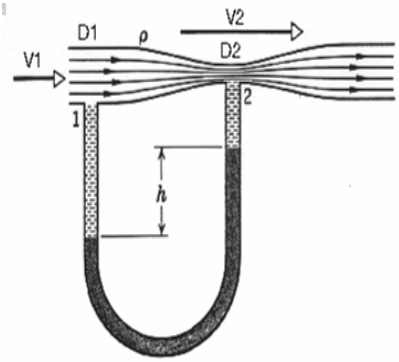


Figura 6: Diagrama del funcionamiento de un tubo Venturi

El medidor Venturi estándar tipo Herschel consiste en un tubo recto, corto, que se conecta en cualquiera de los extremos de la tubería por medio de secciones cónicas. Las proporciones

recomendadas son ángulo del cono de entrada α_1 = 21º ± 2°, ángulo del cono de salida α_2 = 5 a 15°, longitud de la garganta = un diámetro de garganta, toma de corriente arriba localizada de 0.25 a 0.5 diámetro de tubería corriente arriba en relación con el cono de entrada. Para asegurar mejores resultados, conviene que las secciones recta y cónica estén unidas por medio de superficies curvas lisas.

La pérdida de presión permanente para un tubo Venturi tipo Herschel depende de la razón del diámetro β y el ángulo del cono de descarga α_2. Varía de 10 a 15% de la diferencia de presión (p1-p2) para ángulos pequeños (de 5 a 7 grados) y de 10 a 30% para ángulos mayores (15 grados), donde las pérdidas mayores ocurren a los valores más bajos de β para una ecuación general de pérdida de presión para tubos Venturi instalados en tuberías o con entrada plena.

Para el flujo de líquidos debe darse un margen para el cambio de energía potencial cuando se trate de un medidor Venturi inclinado o vertical. [6]

1.3.1.4.2 Bombas de vacío

Una *bomba de vacío* es un equipo mediante el cual se puede extraer aire de un sistema, llevándolo a presiones menores que la atmosférica. Existen tres diferentes clases de bombas de vacío: mecánicas, turbomoleculares (turbobombas) y criogénicas (criobombas). A pesar de su amplio diseño todas tienen el mismo principio en su funcionamiento, empujar gases hacia fuera de un lugar cerrado.

1.3.2 Tecnologías de membrana

Las membranas son utilizadas en dos campos de desalinización comercialmente importantes: electro diálisis (ED) y ósmosis inversa (RO). Cada uno de estos procesos utiliza las capacidades de las membranas de diferenciar y separar selectivamente los iones de sales disociados en el agua y el agua misma. Sin embargo, las membranas se utilizan de manera distinta en cada uno de los procesos. [7]

1.3.2.1 Electro diálisis (ED)

Electro diálisis es un proceso de electro-membranas en el que los iones son transportados a través de membranas permeables de una solución a otra bajo la influencia de un gradiente potencial. Las cargas eléctricas de los iones permiten que éstos sean conducidos a través de membranas fabricadas especialmente con polímeros de intercambio iónico. Aplicando un voltaje entre dos electrodos se genera un campo electrónico requerido para este proceso. Desde que las membranas utilizadas para este proceso tienen la capacidad de transportar iones cargados positiva o negativamente de una manera selectiva y/o rechazar aquellos que

llevan la carga opuesta, la electro diálisis puede ser tomada en cuenta para realizar procesos como remoción y separación de electrolitos, entre otros.

La ED depende de los siguientes principios generales:

- La mayor parte de las sales disueltas en el agua deben ser iónicas y estar cargadas positiva o negativamente.
- Los iones deben migrar hacia los electrodos con la carga eléctrica opuesta.
- Las membranas deben ser construidas de manera que permitan el paso selectivo ya sea de aniones o cationes
- Los componentes de la solución iónica, como el cloro (-) sodio (+), calcio (++) y carbonato (-), están dispersos en el agua, neutralizando eficientemente sus cargas individuales. Cuando los electrodos sean conectados a una fuente externa de corriente directa y puestos directamente en contacto con el agua salada, la corriente eléctrica pasará a través de la solución, y los iones tenderán a migrar hacia el electrodo con la carga opuesta.[8]

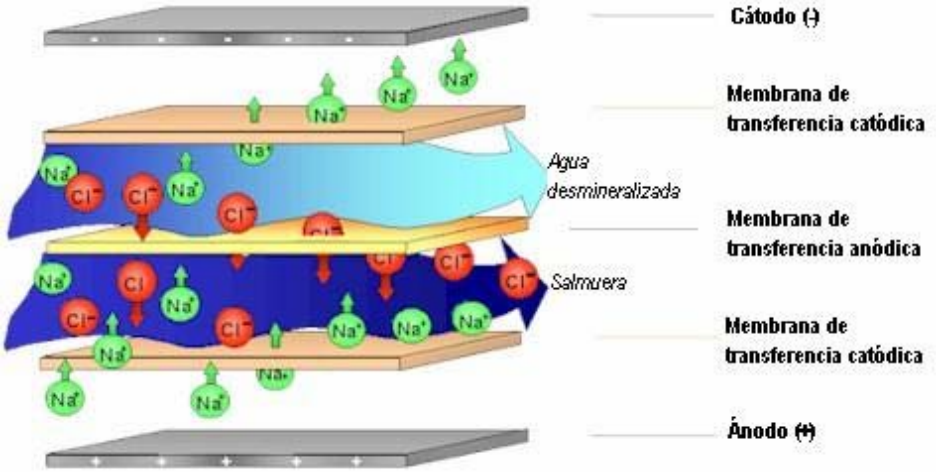


Figura 7: Esquema del funcionamiento de un sistema de electrodiálisis

1.3.2.2 Ósmosis inversa

La OI es un proceso de separación con membrana en el que el agua salada es separada del material disuelto mediante su paso a través de una membrana con una presión muy elevada. No se requiere calentamiento ni cambio de fase para la separación. La mayor fuente de energía requerida es la presurización de la corriente de entrada.

En la práctica, el agua salada es bombeada dentro de un contenedor cerrado donde es presurizada contra la membrana. Mientras una porción de agua pasa a través de la membrana

y el agua remanente incrementa su concentración de sales, una porción de esta agua con alta concentración salina es descargada sin pasar a través de la membrana. Sin la presencia de esta descarga controlada, la corriente presurizada de entrada podría continuar incrementado su concentración de sales creando problemas como precipitación de sales sobresaturadas e incremento de presión osmótica a través de las membranas.

La cantidad del agua de entrada desechada a la corriente de salmuera varía entre 20 y 70 por ciento del caudal de entrada, dependiendo del contenido de sal, la presión y el tipo de membrana.

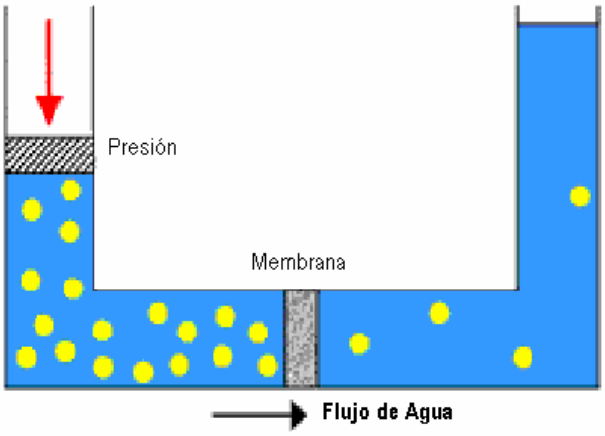


Figura 8: Esquema del funcionamiento de un sistema de ósmosis inversa

1.3.3 Procesos menores

Un buen número de procesos han sido usados para desalinizar agua. Estos procesos no han sido llevados exitosamente a nivel comercial, sin embargo algunos están siendo utilizados.

1.3.3.1 Congelamiento

Enfriando agua salada para formar cristales de hielo bajo condiciones controladas puede llegar a desalinizar agua. Antes que la masa total de agua llegue a congelarse, la mezcla es usualmente lavada y enjuagada para remover las sales en el agua remanente. El hielo entonces es derretido para producir agua fresca.

En teoría, el congelamiento tiene algunas ventajas sobre la destilación, que era la opción para desalinizar predominante en el tiempo en que se desarrollo la tecnología de congelamiento. Estas ventajas incluyen un menor requerimiento energético para un proceso de una sola etapa, un menor potencial de corrosión, y pocos problemas de escalamiento y de precipitación. Una desventaja es que el proceso involucra la manipulación de mezclas de agua y hielo que son mecánicamente complejas de manejar y procesar.

1.3.3.2 Humidificación solar

Estos dispositivos generalmente imitan parte del ciclo natural del agua en el que la energía del sol calienta el agua marina y la producción de vapor de agua (humidificación) se incrementa. El vapor de agua es condensado en una superficie, y recolectado como agua fresca.

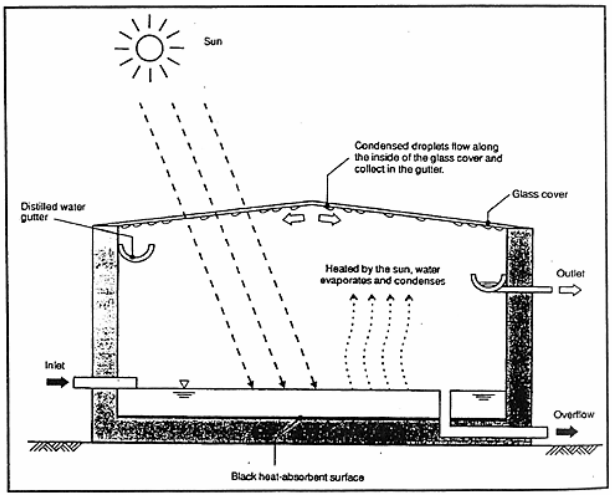


Figura 9: Esquema del proceso de humidificación solar

1.3.3.3 Destilación por membrana

Esta es una técnica por membrana que involucra transporte de vapor de agua a través de los poros de una membrana hidrofóbica debido a la fuerza que ejerce la presión de vapor provista por la temperatura y/o la diferencia de concentración del soluto a través de la membrana.[9]

En este método, las superficies de las membranas están en contacto directo con dos fases líquidas, una solución caliente y una fría también conocida como el “impregnando”. Como ha sido entendido, hay una diferencia de temperaturas pero el equilibrio térmico está bien establecido. Este método esta basado en un flujo a contracorriente de un fluido con diferentes temperaturas. La corriente de entrada de agua de mar fría fluye a través de un condensador de paredes no permeables. Este sistema trabaja con un par de tubos, un condensador y un evaporador. Estos tubos están separados por un hueco de aire. La pared del evaporador esta hecha de una membrana hidrofóbica. Las membranas recomendadas son aquellas con un 60, 70 u 80% de porosidad y un tamaño de poro de 0.1-0.5x10-6 m. Vapor de agua puro pasa a través de las membranas, mientras los sólidos (sales, minerales, etc.) se quedan del otro lado de la membrana. Como fue mencionado, la diferencia de temperaturas de los fluidos, generan una diferencia de presión de vapor, la cual, obliga al vapor para que pase a través de los poros de la membrana del tubo del evaporador y este se condensa en el “hueco” de aire, de esta forma el calor es parcialmente recuperado.

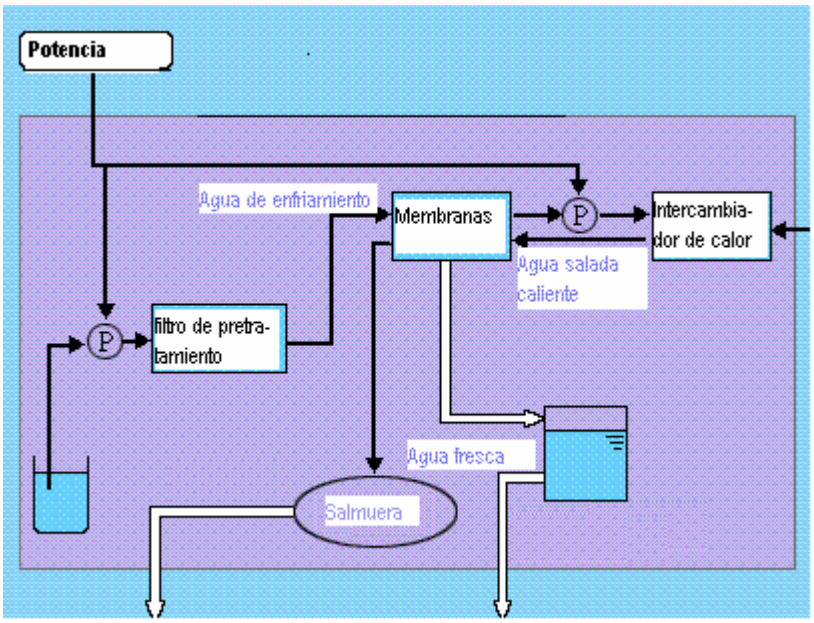


Figura 10: Diagrama de flujo de una destilación por membrana

1.4 Evaluación de las tecnologías de desalinización.

1.4.1 Evaluación general de las tecnologías de desalinización

La siguiente tabla muestra una comparación de las diversas tecnologías de desalinización existentes utilizadas a nivel industrial. Los parámetros evaluados fueron: el tipo de energía, la principal energía consumida, los costos de instalación, la posibilidad de expansión, la confiabilidad operativa, la calidad de desalinización del agua, su dureza y el área requerida para operar.

Característica	MSF	MED	CV	RO	ED
Tipo de energía	Térmica	Térmica	Eléctrica	Eléctrica	Eléctrica
Consumo de energía (kJ/kg)	Alta Mas de 200	Alta/Regular 150-200	Regular 100-150	Baja Menor de 80	Baja Menor de 20
Costos de instalación	Altos	Altos-Regulares	Altos	Regulares	Regulares
Posibilidad de expansión	Difícil	Difícil	Difícil	Fácil	Fácil
Confiabilidad de operación	Alta	Regular	baja	Alta	Alta
Desalinización de agua	Si	Si	Si	Si	No
Calidad de agua (ppm)	Alta, menor de 50	Alta, menor de 50	Alta, menor de 50	Regular 300-500	Menor de 300
Área requerida para operar	Grande	Regular	Pequeña	Pequeña	Pequeña

Tabla 4. Comparativo de tecnologías desalinizadoras

Se considera que la mejor opción para la desalinización del agua marina es la destilación a baja presión, por sus bajos costos de inversión y de operación, energéticamente hablando. Bien es cierto que otras tecnologías también son efectivas y obtienen una alta calidad en el agua fresca obtenida (ppm) pero los costos son un parámetro decisivo para la elección de esta tecnología.

1.5. Ahorro de energía en procesos térmicos

1.5.1 Recuperación de calor

La recuperación y la reutilización del calor en todos los campos: doméstico, comercial, edificios administrativos, etc; es un asunto al cual se le está dando gran énfasis debido a la importancia que tiene el ahorro de energía. Por lo tanto, esto también significa la minimización de costos de operación e impacto ambiental. Las tecnologías de absorción a través de tubos de calor tienen un bajo costo y son eficientes para resolver problemas como calefacción, sistemas de aires acondicionados, etc.

Las máquinas de absorción con tubos de calor acoplados como intercambiadores de calor tienen ciertas ventajas como ciclos cortos, máquinas de cascada compactas y (COP) mejorado por la recuperación de calor por “intercascadas”. Los dispositivos para recuperación de calor pueden ser utilizados en combinación con energía solar, calor de “desperdicio”, o combustibles como su fuente de energía.

En muchas ramas de la industria, se encuentran procesos que se caracterizan por sus bajas temperaturas y pequeños flujos, éstos son un buen ejemplo para el desarrollo de tubos de calor con uso de combustibles. [10]

1.5.2 Bombas de calor

El calor fluye naturalmente de temperaturas altas hacia las bajas. Una bomba de calor es una máquina que hace que el calor fluya en dirección opuesta a su tendencia natural, o sea de frío hacia caliente. Para hacer esto se necesita trabajo (consumo de energía) es por esto que a este dispositivo se le llama “bomba” de calor.

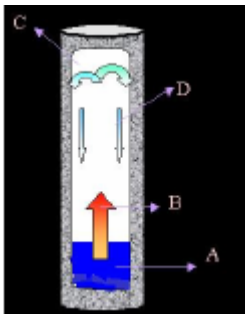
En realidad una bomba de calor no es más que un equipo de refrigeración. Cualquiera de estos sistemas remueve calor de un lugar (para mantenerlo fresco) y lo descarga en un sitio de mayor temperatura. La única diferencia entre una bomba de calor y un equipo de refrigeración es el objetivo deseado: para enfriar un espacio un refrigerador y para calentarlo una bomba de calor. [11|

1.5.3 Tubo de calor

Los tipos de tubos de calor más empleados y conocidos son los: convencionales, de páneles, “loop”, termosifones vapor-dinámicos, micro o miniatura, por absorción, etc.[12]

El tubo de calor es un tubo sellado cuya superficie interna está cubierta por un material poroso, estos poros se llenan del líquido de trabajo, mientras que el volumen interno restante es ocupado por el vapor del líquido. El calor se suministra en un extremo del tubo y se retira por el otro extremo por convección o por radiación.

Es un dispositivo capaz de transportar calor de un lugar a otro mediante la evaporación y condensación de un fluido, recirculándolo dentro de éste por las fuerzas de capilaridad. Por esto, el tubo de calor es capaz de trasportar grandes cantidades de calor a través de distancias considerables, en forma casi isotérmica y sin necesidad de suministrar energía del exterior. Los elementos básicos de un tubo de calor son:



A. El calor se absorbe en la sección de evaporación.
B. El fluido hierve hasta su fase de vaporización.
C. El calor se libera en la parte alta del cilindro al ambiente; el vapor se condensa y vuelve a pasar a estado líquido.
D. El líquido regresa por diferencial de temperaturas y capilaridad a la parte baja del cilindro.

Figura 11: Mecanismo de funcionamiento de un tubo de calor

La superficie interna está recubierta por una capa delgada de material poroso al que se le denomina pabilo. El contenedor generalmente tiene forma cilíndrica, aunque puede tomar otras formas de puedan fabricarse con facilidad. Los poros del pabilo se empapan con el líquido y el resto del espacio se llena con el vapor de éste último.

Si la entrada de calor en el tubo se encuentra en un nivel más bajo que la salida, la gravedad facilita el retorno del líquido condensado, lo cual favorece la transferencia de calor. Si por el contrario, la entrada de calor está a un nivel mayor, la gravedad impide el regreso del líquido condensado y la capacidad de transferencia de calor se reduce.

Los materiales utilizados en la construcción del tubo de calor deben ser compatibles con el fluido de trabajo seleccionado y con el intervalo de temperaturas de operación. El contenedor

debe tener suficiente resistencia a la deformación y buena conductividad térmica. El fluido no debe reaccionar químicamente ni hacer soluble al contenedor ni al pabilo. [13]

1.5.3.1 Características del pabilo

Es una estructura porosa relativamente gruesa que favorece la minimización de la presión capilar que equilibra las diferencias de presión entre el líquido y el vapor dentro del tubo. La selección del pabilo correcto depende de los requerimientos necesarios para una aplicación específica. Si se elige un pabilo poroso, éste puede estar formado por pequeños elementos incluyendo partículas y fibras, también puede estar formado por ranuras hechas en el interior de la pared del tubo. [14]

1.5.3.2 Diseño del tubo

El diseño de este dispositivo se basa fundamentalmente en el flux de calor que se desee recuperar, las constantes geométricas, el tipo de fuente y sumidero de calor. Es importante tomar en cuenta el ambiente en el que operará el dispositivo ya que si es inmerso en un fluido puede sufrir corrosión y oxidación. [15]

1.5.4 Aletas, superficies extendidas de transferencia de calor.

En el diseño y construcción de equipos de transferencia de calor se utilizan formas simples como cilindros, placas planas y barras, las cuales son utilizadas para promover el flujo de calor entre una fuente y el medio, por medio de la absorción o disipación de calor, estas superficies son conocidas como superficies primarias o principales. Cuando a una superficie primaria se le agregan superficies adicionales, estas son conocidas como superficies extendidas o aletas.
Las aletas son sólidos que transfieren calor por conducción a lo largo de su geometría y por convección a través de su entorno, son sistemas con conducción convección. [16]

1.5.5 Manejo eficiente de energía en sistemas industriales

El creciente costo de la energía tiene efecto inflacionario sobre los costos de operación. Una forma lógica de reducir los costos de energía es la recirculación térmica, o recuperación de calor siempre que sea posible. [17]

Las bombas de calor o térmicas son de gran utilidad para recircular la energía térmica en las plantas de procesos químicos. Con el desembolso adicional de capital fijo, en un sistema de bomba de calor se puede lograr una reducción considerable en los costos anuales de calefacción y calentamiento.