



# INFORME 2017-PU-002

## Estudio de Tecnología de Membranas de Destilación

**Autores:**

Felix Carrasco  
Werner Platzer

**Proyecto**

CORFO 13CEI2-21803

**Fecha**

Junio 2017

## Contenido

<b>1</b>	<b>Resumen Ejecutivo</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Introducción</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Recurso hídrico</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Tecnologías de desalinización</b>	<b>7</b>
4.1	Desalinización térmica (Destilación)	8
4.2	Separacion por Membrana	10
<b>5</b>	<b>Destilación por membrana</b>	<b>13</b>
5.1	Configuración de sistemas de membrana	14
5.2	Características de membranas	17
5.2.1	Material membrana	17
5.2.2	Módulos de Membrana	18
<b>6</b>	<b>Estudios de Aplicaciones de Membrana de Destilación</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>Potencial de sustentabilidad de tecnología MD</b>	<b>31</b>
7.1	Membrana de Destilación y Energía Solar	31
7.2	Membrana de Destilación asociado a procesos	36
7.3	Membrana de Destilación y Geotermia	39
<b>8</b>	<b>Sistemas Híbridos de MD</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Costos de tecnología MD</b>	<b>45</b>
9.1	Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento de plantas de MD	46
9.2	Comparación con tecnologías competidoras	49
<b>10</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>52</b>
<b>11</b>	<b>Referencia</b>	<b>54</b>

## 1 Resumen Ejecutivo

Este informe realiza una revisión de la tecnología de Membrana de Destilación (MD), para el tratamiento de aguas salobres, agua de mar o agua de procesos industriales.

Para esta revisión, el informe consta de un análisis del recurso hídrico en nuestro país de manera de entender el escenario de la disponibilidad de este recurso en Chile, identificando además los sectores productivos que consumen este recurso, y geográficamente determinar las zonas que se ven más afectadas por la escases de este elemento.

Posteriormente se hace un breve análisis de las tecnologías disponibles para tratar aguas salobres, donde existen las tecnologías de destilación térmica y las de destilación por membrana.

Luego se analiza con mayor detalle la tecnología de Membrana de Destilación, indicando características principales, tipos de configuración disponibles, características de membranas, materiales y módulos de membrana más utilizados.

A continuación se analizan distintas experiencias en el uso de esta tecnología para distintas aplicaciones, que van desde desalinización de agua de mar hasta tratamiento de agua de procesos industriales. Luego se muestran experiencias que se enfocan el potencial de sustentabilidad que posee el proceso de MD, al ser acoplado con tecnologías como solar, geotermia, y utilizando el calor residual de procesos industriales de diferente índole.

Finalmente se realiza una revisión de los costos asociados a esta tecnología, tanto en inversión como en operación; para además incluir una comparación con tecnologías competidoras; y se cierra el informe con conclusiones que incluyen proyecciones y desarrollos que aún se deben realizar en esta tecnología.

## 2 Introducción

En el mundo actualmente existen más de 18.000 plantas de desalinización, con una producción máxima de 90 millones m<sup>3</sup>/día [1]. La tecnología más utilizada corresponde a Osmosis Inversa (OI), que ocupa el 60% del mercado de tecnologías de desalinización a nivel mundial, seguida por Destilación Flash de Múltiple Efecto (MSF) y Destilación de Multiefecto (MED).

Las tecnologías existentes de desalinización térmica (MSF y MED), vaporizan agua fresca, mientras que la tecnología dominante de membranas, OI, utiliza alta presión a través de bombas impulsadas eléctricamente, haciendo pasar el agua tratada a través de una membrana donde se retienen las impurezas.

Las tecnologías actuales de desalinización con energías renovables aún son costosas, y los últimos esfuerzos se han centrado en bajar sus costos acoplándolas con tecnologías de energías renovables, como fotovoltaica y calor solar, sin embargo estos desarrollos requieren de costos de inversión elevados.

El presente estudio tiene por objeto dar una visión general de las características, estado del arte, ventajas y desventajas de la tecnología de Membrana de Destilación (MD), incluyendo características técnicas, análisis económico y comparación de esta alternativa con las tecnologías comúnmente usadas; mencionando especialmente el potencial de esta tecnología en sistemas híbridos, complementándose con tecnologías existentes de desalación, utilizando calor de rechazo de proceso o acoplado a tecnologías renovables.

### 3 Recurso hídrico

En Chile el recurso hídrico presenta una realidad de contrastes. Si bien a nivel país, la escorrentía per cápita (cantidad de agua de precipitaciones de escurrimiento superficial por persona) asciende a 52.218 m<sup>3</sup>/pers./año, lo cual es alto considerando que la media mundial es de 6.600 m<sup>3</sup>/pers./año; en el norte del país esta cantidad desciende a 510 m<sup>3</sup>/pers./año, donde se considera la denominada Macrozona Norte [2], que considera las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Coquimbo.

Junto a lo anterior, la realidad del cambio climático ya se encuentra afectando al país con una importante sequía, que incluso ha incluido regiones del sur de Chile, caracterizadas por una importante cantidad de precipitaciones anuales, con una escorrentía promedio de 7.000 m<sup>3</sup>/pers/año [2].

La demanda de agua en Chile se concentra en el uso Agropecuario, seguido la demanda de Agua Potable, Industria y Minería (Tabla. 3.1 [2]).

**Tabla 3.1 Demanda de agua por sector [m<sup>3</sup>/s]**

Zona	Agropecuario	Agua Potable	Industrial	Minero	Total (m <sup>3</sup> /s)
Norte	51,45	6,09	3,74	10,41	71,69
Centro	389,25	20,23	20,23	4,04	451,69
Sur	84,26	13,89	13,89	2,71	110,77
Austral	1,76	5,99	5,99	2,83	11,25
<b>Total (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>526,72</b>	<b>54,84</b>	<b>43,85</b>	<b>19,99</b>	<b>645,40</b>

La mayor demanda se concentra en la zona Centro, impulsada principalmente por el área agropecuaria y por el agua potable considerando que esta zona concentra la mayor parte de la población nacional. En la zona norte donde el recurso hídrico es más escaso, la demanda de agua se concentra en la actividad agropecuaria, seguido por el área minera.

Además vale mencionar que se han realizado declaraciones de agotamiento, instrumento por el cual la DGA (Dirección General de Aguas) señala respecto del agotamiento de algún recurso hídrico superficial (rio, lago, laguna, etc.) Esta declaración corresponde a una medida de protección que impide la constitución de nuevos derechos de agua permanentes. La mayor parte de estas declaraciones de agotamiento se encuentran en la zona norte y centro del país. Además

existen prohibiciones de extracción de aguas subterráneas concentradas en la zona norte y centro. Finalmente en la zona norte existe un número importante de acuíferos protegidos (216), desde el año 1996, los cuales alimentan ecosistemas únicos de esta zona del país. Estos acuíferos se encuentran distribuidos en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta.

Con este escenario planteado, se entiende que las regiones de la zona norte son las que presentan el mayor stress hídrico, considerando la escasez del recurso, restricciones de uso, y la actividad económica presente en la zona concentrada en la actividad minera, la cual con su crecimiento implica también un crecimiento demográfico.

Actualmente en Chile existen 19 plantas desalinizadoras, concentradas principalmente en la zona norte. De estas plantas, 11 abastecen a la industria minera, 7 para consumo humano y 1 para uso industrial; y adicionalmente, existen 16 proyectadas con distintos grados de avance. La tecnología dominante en estas instalaciones es la de Osmosis Inversa (OI), la cual requiere de un importante consumo energético (Tabla 3.2 [2]).

**Tabla 3.2 Proyectos de Desalinización en Chile**

Estado	Cantidad	Capacidad (l/s)	% producción
Operación	19	2893,15	23,3%
Calificación	5	3925,6	31,5%
Construcción	2	2520	20,3%
Aprobada	5	1354,3	10,9%
Factibilidad	4	1750	14,1%
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>12443,05</b>	<b>100,0%</b>

## 4 Tecnologías de desalinización

El proceso de desalinización consiste en retirar los minerales o sales presentes en el agua. La presencia de estos elementos en el agua se indica como TDS (Total Dissolved Solids) o Salinidad, que expresa la concentración de estos elementos en miligramos por litro (mg/L). La Organización Mundial de la Salud, junto con otros organismos, ha establecido que el agua potable debe tener un máximo de 500 mg/L [3].

Las aguas salobres se consideran entre 500 y 15.000 mg/L; y las aguas por sobre 15.000 mg/L se clasifican como agua de mar, y en general se encuentra en el rango de 33.000 a 45.000 mg/L.

**Tabla 4.1: Salinidad tipo de agua de mar [3].**

Agua de mar	Salinidad tipo (mg/L)	Temperatura °C
Océano Pacífico	35.000	9 – 26 (prom. 18)
Mar Caribe	36.000	16 – 35 (prom. 26)
Mar Mediterráneo	38.000	16 – 35 (prom. 26)
Océano Índico	40.000	22 – 35 (prom. 30)
Mar Rojo	41.000	24 – 32 (prom. 28)
Golfo Pérsico	45.000	16 – 35 (prom. 26)

Las aguas de mar y aguas salobres usualmente son desalinizadas por dos mecanismos de proceso de tratamiento de aguas: Desalinización Térmica (Destilación) y Desalinización por Membrana y otros procesos.

El primer mecanismo considera separar las partículas de agua por medio de un cambio de fase, en este caso por medio de la evaporación. Dentro de esta categoría se encuentran los procesos de Destilación de Multiefecto, Destilación Flash de Múltiple Efecto y Destilación por Compresión de Vapor.

El segundo mecanismo no utiliza cambio de fase, si no que utiliza membranas semi permeables de manera de filtrar las aguas salobres reteniendo las partículas de minerales y sales en dichas membranas. En esta categoría se encuentran los procesos de Osmosis Inversa y Electrodiálisis.

Además de estos dos mecanismos existen otras tecnologías como Intercambio Iónico, Membrana de Destilación y Destilación Térmica de baja temperatura.

En cuanto a la aplicación de estas tecnologías según las características de salinidad del agua, la tabla 4.2, muestra una indicación generalizada para su aplicación de manera eficiente.

**Tabla 4.2: Aplicación de procesos de desalinización [3].**

Proceso	Rango de Salinidad (mg/L)
Destilación	20.000 – 100.000
Osmosis Inversa	50 – 46.000
Electrodialisis	200 – 3.000
Intercambio Iónico	1 - 800

Actualmente, existen aproximadamente 18.000 plantas de desalación instaladas en el mundo, con una capacidad total de 90 millones de metros cúbicos de agua por día [1]. De esta capacidad instalada aproximadamente, un 60% corresponde a plantas de Osmosis Inversa, convirtiéndose en la tecnología o diseño dominante; y un 34% corresponde a instalaciones de desalación térmica [3]. El resto es ocupado por tecnologías de Electrodialisis o Intercambio Iónico.

#### 4.1 Desalinización térmica (Destilación)

La mayoría de las tecnologías de desalinización térmica aplican destilación, es decir, el agua salada debe ser sometida a calor de manera de lograr la evaporación del agua pura para luego condensarla, obteniendo agua de baja salinidad.

Al no depender de la salinidad del agua, el proceso de evaporación puede ser aplicado a cualquier tipo de agua salada, el proceso de destilación puede ser aplicado a aguas con alto nivel de sales o salmueras.

Este tipo de proceso ha sido ampliamente utilizado en países como Arabia Saudita, Omán, Qatar y Emiratos Árabes entre otros, donde poseen las aguas con mayor salinidad del planeta (Mar Rojo, Golfo Pérsico, Golfo de Omán, y Océano Indico). Actualmente el 75% de las plantas de desalinización térmica se encuentran en la Península Arábiga, donde generalmente se acoplan con plantas térmicas de generación eléctrica, utilizando vapor de bajo costo.

Los tipos de tecnologías más usados son Destilación de Multiefecto (MED), Destilación Flash de Múltiple Efecto (MSF) y Destilación por Compresión de Vapor (VC), las cuales han sido desarrolladas durante los

últimos 40 a 60 años. Estas tecnologías difieren principalmente por temperatura y presión de operación.

La tecnología MSF hierva el agua a una presión cercana a la atmosférica y a una temperatura de 100°C [3]. Esta tecnología requiere de una gran cantidad de vapor. Los procesos de MED y VC son tecnologías más nuevas, las cuales incrementan su eficiencia hirviendo agua a una temperatura menor si el proceso ocurre a una presión menor que la atmosférica.

Los procesos de destilación son evaluados por medio de la relación de desempeño “gained output ratio” (GOR), que es la relación entre el flujo de destilado y la cantidad de vapor utilizado para el proceso. Este valor varía entre 4 y 40, para este tipo de tecnología [3]. A mayor GOR, mayor es la eficiencia de la tecnología.

La Destilación Flash Multietapa (MSF) calienta el agua salobre a una temperatura de 90 a 115°C [3], de manera de crear vapor de agua. En la primera etapa del proceso, el agua se mantiene a una presión menor a la presión de saturación, para luego pasar al calentador donde se produce vapor a alta presión el cual al ingresar a la primera etapa de la destilación, su presión es reducida rápidamente con lo cual se produce vapor “flash”. Cada etapa de destilación tiene un condensador para obtener destilado a partir del vapor flash.

En cada etapa de destilado se recupera hasta un 1% de agua destilada. Actualmente existen equipos de 45 etapas con lo cual el porcentaje de recuperación es de 45%, con lo cual compite con tecnologías como la Osmosis Inversa (40 – 45% recuperación). Las últimas tecnologías de MSF presentan valores de GOR de 7 a 9. La potencia de bombeo requerida por estos sistemas está en el orden de 2 a 3,5 kWh/m<sup>3</sup> de agua producida [3].

La Destilación de Multiefecto es una tecnología que usualmente recibe el agua salada no precalentada. El agua salada es inyectada y pulverizada por medio de boquillas en bancos de tubos de intercambiadores de calor. El vapor generado para por eliminadores de niebla y se colectan las gotas de condensado. La diferencia del proceso MED con el de MSF es que en este último el vapor es generado por flashing, y en el caso de MED la evaporación es lograda por el proceso de transferencia de calor entre el vapor dentro de los tubos y el agua pulverizada.

La tecnología MED opera a temperaturas menores, entre 62 a 75°C y alcanza mayores índices GOR (hasta 24). En cuanto al consumo eléctrico para bombeo, éste se encuentra entre 0,8 a 1,4 kWh/m<sup>3</sup> [3].

Finalmente, la tecnología de Compresión de Vapor (VC) corresponde a la que utiliza el vapor comprimido producido por un compresor mecánico o un generador de vapor. En estos sistemas el agua salina es evaporada y dicho vapor es llevado hacia un compresor. El vapor cuando es comprimido incrementa su temperatura y evapora el agua que es pulverizada sobre el banco de tubos que lleva el vapor, la cual luego se condensa formando el agua destilada. La potencia requerida para la operación de estos sistemas esta entre 8 y 12 kWh/m<sup>3</sup> de agua pura.

Existe otra tecnología de proceso térmico por medio del cual se puede desalinizar agua. Este corresponde al Congelamiento, proceso que busca bajar la temperatura del agua al punto de congelación para luego separar y licuar los cristales de agua formados. La temperatura de trabajo de estos sistemas es de -5°C (punto de congelación de agua de mar).

Adicionalmente a las tecnologías mencionadas, existen otras tecnologías de destilación térmica como la Destilación Solar y Evaporación rápida; y otras que no han sido ampliamente explotadas desde el punto de vista comercial, sin embargo han sido estudiadas y se han fabricado prototipos de estas. En este informe se estudiará específicamente una de ellas, la tecnología de Membrana de Destilación, y su potencial de uso en Chile.

## 4.2 Separacion por Membrana

Esta tecnología utiliza membranas semipermeables para separar los minerales del agua. Existen dos tipos de tecnología que actualmente se encuentra en uso, Electrodiálisis (ED) y Osmosis Inversa (OI).

La Electrodiálisis, aplica una corriente eléctrica directamente en el agua salada. Esta corriente lleva a los iones de mineral cargados hacia electrodos de cargas opuestas, pasando antes por membranas semipermeables selectivas. Los iones acumulados en los electrodos generan incrustaciones por lo cual deben ser mantenidas constantemente. Una solución para lo anterior es invertir periódicamente la polaridad de los electrodos. En la actualidad, prácticamente todas los sistemas de Electrodiálisis son del tipo

Electrodialisis Reversa (EDR), la cual cambia la polaridad de los electrodos.

Estos sistemas consisten en una gran cantidad de pares de electrodos (300 a 600 pares), separados por membranas, las cuales tienen una estructura similar a las utilizadas para la micro y ultrafiltración.

Los sistemas de Electrodialisis pueden recuperar aproximadamente un 95% de agua pura. La energía utilizada para estos sistemas varía según las características del agua a ser tratada, con lo cual se considera como una tecnología competitiva en concentraciones menores a 3000 mg/l. En general esta tecnología es efectiva en la remoción de elementos que posee una carga eléctrica fuerte como los iones de sal, sílice, nitratos, y radio; pero poseen una baja eficiencia en la captura de elementos con bajas cargas eléctricas como materiales orgánicos, y patógenos.

**Tabla 4.3: Porcentaje de remoción de contaminantes para tecnologías de Destilación en comparación con tecnologías de membrana [3].**

Contaminante	Destilación (%)	ED/EDR (%)	OI (%)
TDS	>99.9	50 – 90	90 – 99.5
Pesticidas, Orgánicos	50 – 90	<5	5 – 50
Patógenos	>99	<5	>99.99
TOC (Carbono orgánico Total)	>95	<20	95 – 98
Radiológico	>99	50 – 90	90 – 99
Nitrato	>99	60 – 69	90 – 94
Calcio	>99	45 – 50	95 – 97
Magnesio	>99	55 – 62	95 – 97
Bicarbonato	>99	45 – 47	95 – 97
Potasio	>99	55 – 58	90 – 92

La tecnología más utilizada para la desalinización de agua corresponde a la Osmosis Inversa (OI). En este proceso los contaminantes presentes en el agua (sólidos suspendidos, material orgánico, microorganismos, y gases disueltos), son pasados por efecto de aplicar presión al fluido, a través de una membrana semipermeable, donde son retenidos, dejando pasar sólo el agua. La tabla 4.3, indica la capacidad de remoción de diferentes tipos de contaminantes presentes en el agua, para tecnologías de destilación y tecnologías de membrana (ED/EDR y OI). La cantidad de agua recuperada con la tecnología de Osmosis Inversa se encuentra entre 40 y 45 % del agua salada ingresada al sistema.

Para que el sistema de OI opere correctamente, se deben incorporar mecanismos para la remoción de material particulado (sólidos

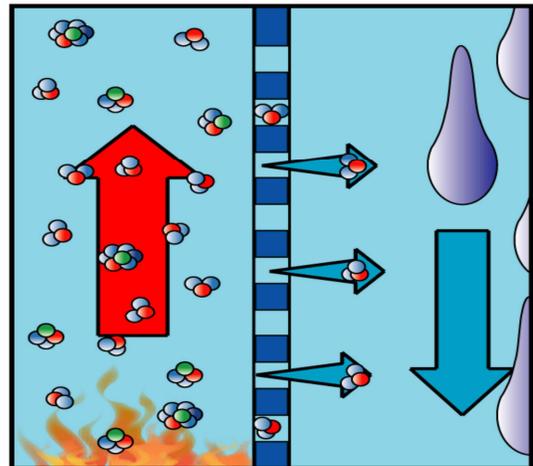
suspendidos), previo a que el fluido pase por las membranas. Esto se debe a que las membranas no pueden retener y remover grandes cantidades de sólidos suspendidos, con lo cual si se dejan en el agua, las membranas rápidamente se pueden ensuciar. Considerando lo anterior se hace necesaria la instalación de sistemas de pretratamiento con lo cual se debe tratar la turbiedad, sólidos suspendidos, microorganismos, algas, etc. Entre estos sistemas se cuentan tratamientos químicos, filtrado, flotación, micro y ultrafiltración por membrana, y filtración por cartuchos.

La demanda de electricidad de los sistemas de Osmosis Inversa es de aproximadamente  $2.5 \text{ kWh/m}^3$ , a un costo de 1 a 2 USD/ $\text{m}^3$ , y en plantas de capacidades mayores llega a  $0,5 \text{ USD/m}^3$  [3].

## 5 Destilación por membrana

La tecnología de Destilación por Membrana posee características de la Desalinización Térmica (Destilación) y de la Desalinización por Membrana.

Esta tecnología es térmicamente impulsada y utiliza una membrana hidrofóbica para su operación. Su mecanismo se basa en la diferencia de la presión de vapor de la solución salina (a mayor temperatura), con el agua pura que se encuentra al otro lado de la membrana que se encuentra a menor temperatura. Las moléculas de vapor de agua presentes en la solución salina pasan a través de la membrana hidrofóbica y porosa, condensándose en el lado del flujo frío.



**Figura 5.1:** Esquema de operación de sistema DCMD de membrana de destilación [4].

Este concepto nace en el año 1960, sin embargo no fue comercializado porque no existían membranas adecuadas de las características requeridas y a un costo razonable; y además también la tecnología de Osmosis Inversa no resultó ser favorable. La desalinización fue realizada por otras plantas térmicas como MED y MSF. Actualmente el desarrollo de materiales poliméricos de características hidrofóbicas junto con los avances en los procesos de fabricación, propician la factibilidad de fabricar módulos de membrana a bajo costo, y que sean competitivos con otros procesos de desalinización.

Esta tecnología presenta algunas ventajas comparativas respecto de los demás sistemas de desalación. Dentro de estas ventajas se cuentan la menor temperatura requerida para su operación (60 – 80°C), no requiere que el agua a tratar sea llevada a su temperatura de ebullición en comparación con otros sistemas de destilación; y requiere además de

una menor presión hidrostática para operar en comparación con el sistema de Osmosis Inversa.

En cuanto a las características de las membranas utilizadas, esta puede ser plástica con lo cual se pueden disminuir los costos y disminuir los problemas de corrosión. Además, considerando que los poros requeridos deben ser de mayor tamaño en comparación con los utilizados por ejemplo por el proceso de OI, hace que este sistema presente menos incrustaciones. Esta tecnología es capaz de acoplarse con fuentes energéticas renovables como lo es la energía solar y geotérmica; y operar con otras tecnologías de tratamiento como Osmosis Inversa o Ultrafiltración. Los sistemas de Membrana de Destilación son factibles de ser usados para tratar agua de mar y aguas salobres superficiales y subterráneas; además puede ser utilizada para remover material orgánico y metales pesados de soluciones acuosas de rechazo de procesos productivos.

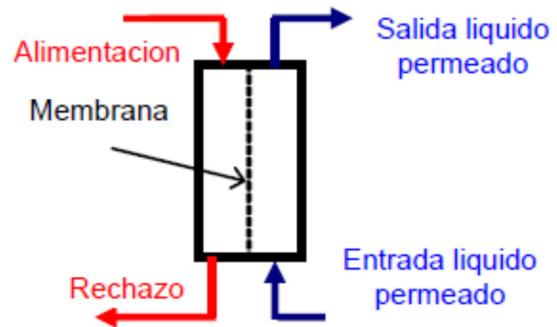
## 5.1 Configuración de sistemas de membrana

Los sistemas de membrana de destilación se presentan en diferentes configuraciones, las cuales se detallan en los siguientes párrafos. La clasificación depende principalmente del método como se induce el paso del vapor de agua a través de la membrana y de cómo se colecta este vapor y se saca del sistema.

- **Membrana de Destilación de Contacto Directo (DCMD).**

En esta configuración (Fig. 5.2), la solución salina a mayor temperatura, se encuentra en contacto directo con la membrana, al igual que el lado donde circula el agua permeada, a una menor temperatura. El vapor agua presente en la solución salina pasa a través de la membrana, condensándose al otro lado de ésta.

Ésta corresponde a la configuración más simple y es la más utilizada a nivel experimental, pero no a nivel comercial. Además esta configuración permite un flujo de permeado más estable, y es apropiada para el retiro de componentes volátiles presentes en el agua salada.



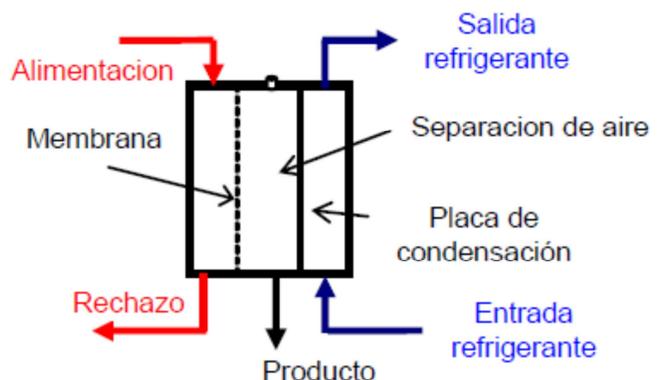
**Figura 5.2:** Esquema de operación de sistema DCMD de membrana de destilación [4].

Su mayor desventaja es su baja eficiencia térmica, debido a la pérdida de calor por medio de conducción, a pesar que los materiales de fabricación de membranas tienen una baja conductividad térmica. El flujo de permeado obtenido por medio de esta configuración es menor al obtenido con sistemas que incorporan el vacío para la extracción del flujo permeado. Finalmente, el flujo de permeado es sensible a la concentración de la salmuera y a la capacidad hidrofóbica de la membrana.

- **Membrana de Destilación con Separación de Aire (AGMD)**

La configuración AGMD, considera que la solución salina se encuentre en contacto directo con la membrana, donde el otro lado de está en contacto con un espacio de aire estanco que separa la membrana de la superficie de condensación (placa de condensación).

El vapor de agua pasa por la membrana, pasa a través del espacio de aire y luego toma contacto con la placa de condensación, donde escurre el agua producto.



**Figura 5.3:** Esquema de operación de sistema AGMD de membrana de destilación [4].

Este sistema presenta la ventaja de disminuir las pérdidas de calor por medio de conducción, a diferencia de lo que sucede en la configuración DCMD, junto a esto, presenta y una menor tendencia a presentar incrustaciones.

Sin embargo, esta configuración suma una resistencia adicional al flujo de masa debido a la separación de aire, y una menor diferencia térmica entre el lado del flujo caliente y el frío, con lo cual disminuye el flujo de permeado requiriendo de mayor superficie de membrana.

- **Membrana de Destilación con Vacío (VMD)**

La operación de la membrana de destilación con vacío se caracteriza por reemplazar la cámara de aire estanco utilizada en AGMD, por una cámara al vacío, de manera de formar una diferencia de presión de vapor, con lo cual teóricamente esta configuración puede generar mayor cantidad de destilado a una misma temperatura de entrada de la salmuera. El producto final es obtenido en un condensador ubicado aguas abajo.

Las desventajas de este sistema son que puede presentar mayor cantidad de incrustaciones en la membrana, posee una mayor probabilidad de que se mojen los poros de la membrana, y posee una menor capacidad de seleccionar el paso de componentes volátiles. Finalmente requiere de dos equipos adicionales para la operación, una bomba de vacío y un condensador externo.

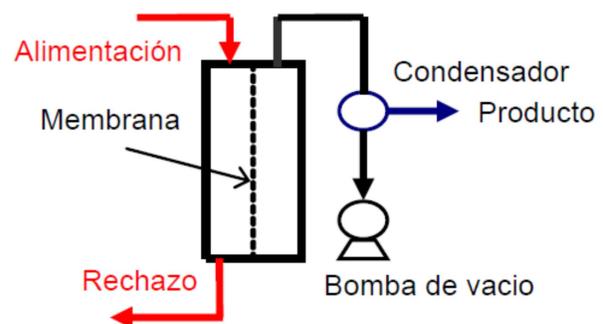


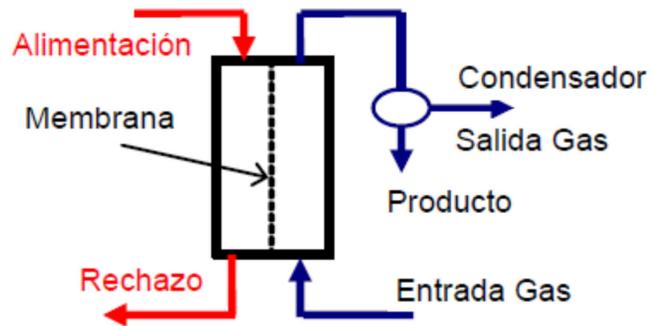
Figura 5.4: Esquema de operación de sistema VMD de membrana de destilación [4].

- **Membrana de Destilación con Barrido de Gas (SGMD)**

En esta configuración, el producto permeado a través de la membrana es retirado del sistema por medio del flujo de un gas inerte. La condensación del producto es realizada externamente en un

condensador de mayor tamaño; requiriendo de grandes volúmenes de gas para retirar bajas cantidades de vapor de agua.

Este sistema debe tener un soplador o condensador de manera de mantener el flujo de gas, lo cual implica un mayor costo energético, mayor inversión y costos de mantención mayores. Además, la recuperación de calor es compleja, el flujo de permeado es menor en comparación con otras configuraciones y es probable que se deba realizar un pretratamiento al gas utilizado.



**Figura 5.5:** Esquema de operación de sistema VMD de membrana de destilación [4].

## 5.2 Características de membranas

### 5.2.1 Material membrana

Las membranas utilizadas deben ser de características hidrofóbicas y micro porosas, no debe permitir la condensación de agua dentro de los poros y solo las moléculas de vapor deben poder pasar a través de la membrana. Además debe poseer una baja conductividad térmica, de manera de evitar la pérdida de calor a través de ella, junto con poseer una buena resistencia a la acción de agentes químicos.

La característica hidrofóbica de la membrana es medida por el índice LEP (presión de entrada de líquido). Este valor corresponde a la presión hidrostática máxima que debe ser aplicada al fluido de manera que las moléculas de líquido no penetren en la membrana a través de sus poros. Esta característica depende del tamaño máximo de los poros de la membrana, ángulo de contacto de la gota con la superficie, y la tensión superficial del líquido. Las membranas con mayor ángulo de contacto,

menor tamaño de poro y alta tensión superficial tendrán un mayor valor LEP.

En cuanto al espesor de membrana, este es inversamente proporcional a la cantidad de permeado que pasa a través de la membrana, debido al aumento en la resistencia a la transferencia de masa en la membrana; y además, la pérdida de calor se disminuye con el aumento del espesor de la membrana. Sin embargo, existe un conflicto entre considerar una membrana delgada para obtener un mayor flujo permeado, pero que favorece la eficiencia térmica; ante lo cual se debe buscar el espesor de membrana óptimo. [6]

Otra característica importante de la membrana utilizada corresponde a su estabilidad química y térmica. La membrana debe tener la capacidad de resistir la acción de agentes químicos presentes en el agua, por ejemplo gases ácidos y corrosivos disueltos, pueden hacer que las membranas se vuelvan menos resistentes. Finalmente, las membranas deben tener la capacidad de no presentar degradación o descomposición pues sus propiedades pueden presentar cambios.

Para la fabricación de membranas, el polímero es disuelto en solvente; luego esta solución homogénea es moldeada como una lámina plana, de manera de formar una membrana capilar. Durante este proceso el polímero precipita y el solvente permanece líquido y forma los poros.

Los materiales más utilizados para la fabricación de membranas, corresponden a polipropileno (PP), Polifluoruro de vinilideno (PVDF) y politetrafluoroetileno (PTFE o Teflón).

## 5.2.2 Módulos de Membrana

Un diseño correcto de módulos de membrana para un proceso de MD, debe proveer de una alta tasa de transferencia de masa y de calor a baja temperatura, además de generar una baja tasa de incrustaciones.

Sin embargo, industrialmente no existen módulos de membrana disponibles, lo cual corresponde a una limitante de la tecnología MD por el momento. Pero esto puede cambiar en el futuro, y también hay mayores capacidades en desarrollo. La mayoría de los diseños de tubos y coraza, y membrana en espiral han sido diseñados para otros procesos de separación, pero no para MD.

Las principales características de los diseños de módulos de membrana para que cumplan con lo requerido por la tecnología de Membrana de Destilación corresponden a que el modulo deberá tener una alta densidad de membrana, es decir área de membrana por unidad de volumen del módulo; además deberá permitir un alto flujo de agua a ser tratada y presentar un alto flujo de permeado.

Junto con lo anterior, los módulos deberán presentar una resistencia a la presión, temperatura y acción de agentes químicos. Además, el modulo debe permitir realizar el secado, limpieza, inspección, mantención y reemplazo de las membranas

Las configuraciones de membrana mencionadas en el punto 5.1, se presentan en diferentes diseños de módulos de membrana indicados a continuación.

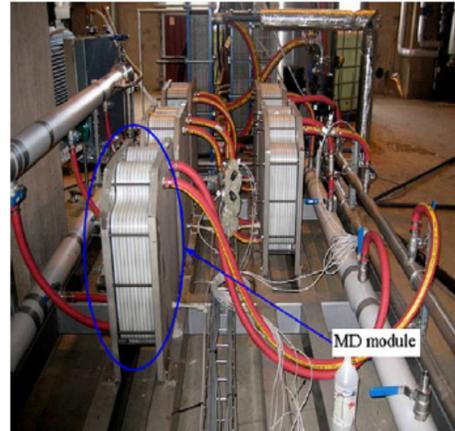
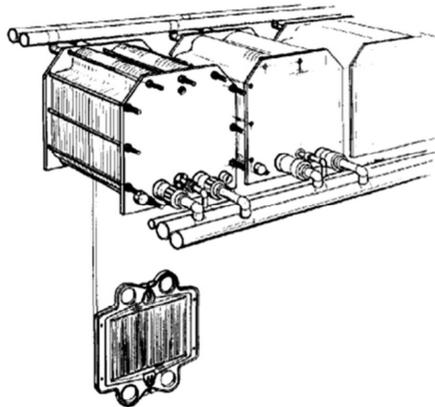
Esta configuración es ampliamente utilizada en equipos intercambiadores de calor. En tecnología de membrana, este diseño es utilizado en equipo de Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Electrodiálisis (ED), entre otros.

En tecnología de Membrana de Destilación, este diseño es ampliamente utilizado a nivel de laboratorio para todas las configuraciones del proceso (DCMD, AGMD, SGMD y VMD), por su fácil construcción, limpieza y reemplazo. Este tipo de configuración es ampliamente usada para desalinización y tratamiento de aguas.

En este diseño, la membrana se encuentra en secciones de área definida en marcos, intercalada con separadores, donde se forman canales por medio de juntar marcos de membrana similares. Para cerrar el arreglo de membrana se utiliza una placa de cierre que proveen estabilidad mecánica y las conexiones para la entrada y salida de fluidos (Fig. 5.6).

El área total de membrana se determina y ajusta por el número de marcos que se utilizan, ya sea en paralelo o serie. Los fluidos son suministrados y distribuidos por medio de manifolds, que permiten el flujo paralelo, contraflujo y flujo cruzado en los módulos de membrana. Este diseño permite su fácil escalamiento con un mínimo de trabajo de cañerías en el exterior.

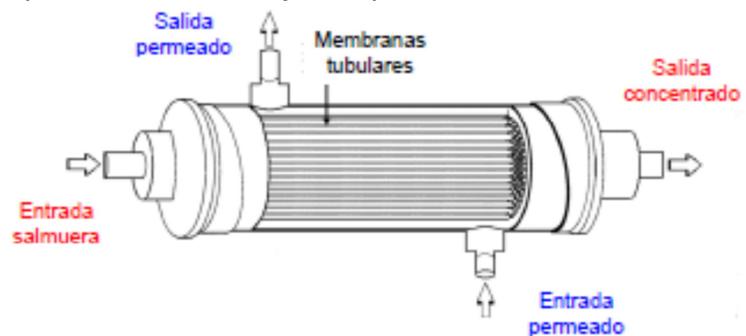
**Figura 5.6:**  
(Izq), Esquema de arreglo de marco y placas de membrana.  
(Der), Modelo de laboratorio, sistema AGMD preparado por la empresa Scarab AB y XZero AB [7].



La densidad de membrana por cada módulo o paquete va desde 100 a 400 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> [7], dependiendo del tamaño de cada módulo y de los marcos de membrana utilizados. Otro punto que caracteriza este arreglo es que es robusto ante las incrustaciones y atascamiento de material filtrado.

Este diseño considera una gran cantidad de fibras huecas ordenadas y selladas dentro de una coraza cilíndrica, que generalmente es de acero inoxidable, vidrio o plástico reforzado. El flujo de agua salobre ingresa por dentro de las fibras y el permeado fluye a través de las paredes de las fibras y es colectado fuera de éstas; o viceversa.

En este diseño se puede considerar el uso de membranas tubulares, membranas capilares y fibra huecas. En la configuración con membranas tubulares, los diámetros de los tubos contenedores pueden variar de 10 a 25 mm, con densidades de membrana de  $300 \text{ m}^2/\text{m}^3$  por módulo [7]. Este tipo de membrana es recomendable en el tratamiento de fluidos de mayor viscosidad y cuando se usan flujos mayores.



**Figura 5.7:** Arreglo tubos y carcasa para membranas tubulares [5].

En este diseño las membranas toman forma tubular al ser insertadas entre dos cámaras cilíndricas (cámara fría y caliente). Este arreglo posee ventajas tales como su baja tendencia a presentar incrustaciones, fácil limpieza, y una gran área efectiva de membrana. Sin embargo presenta una baja densidad de área de membrana y posee un costo de operación mayor. Este tipo de membranas han sido utilizadas en DCMD, VMD y AGMD, para el tratamiento de solución acuosa de NaCl, donde el rechazo de sal fue de 99%.

Los diámetros de las membranas capilares van desde 0,2 a 3 mm, lo que permite instalar un gran número de estos elementos en un módulo, llegando a densidades de  $600$  a  $1200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , por módulo [7].

En el caso de membranas de fibras huecas, los diámetros internos de éstas van desde 50 a 100  $\mu\text{m}$ , y miles de estas pueden ser dispuestas en un módulo contenedor, llegando a densidades de membrana de hasta  $3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  [7], resultando unidades más compactas. Otra ventaja de este tipo de membranas es su bajo consumo energético, sin embargo

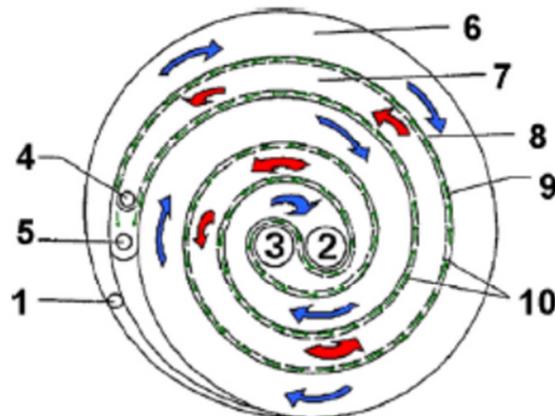
poseen la desventaja de tener una alta tendencia a presentar incrustaciones y son difíciles de limpiar y mantener.

Este diseño es ampliamente utilizado en sistemas de tratamientos de agua presurizados, como por ejemplo en la Osmosis Inversa, donde casi todos los sistemas poseen de este tipo de módulos; además los sistemas de Ultrafiltrado (UF) y Nanofiltración (NF), también los utilizan.

En su aplicación al proceso de Membrana de Destilación (MD), este diseño considera una membrana enrollada con espaciadores, alrededor de tubos de colección central. El agua a tratar se mueve de forma axial a través de las capas de membrana, mientras que el flujo de permeado se mueve de forma radial hacia el tubo de colección.

La densidad de cada módulo va desde 300 a 1000  $\text{m}^2/\text{m}^3$  [7], dependiendo del largo del módulo cilíndrico. Estos módulos han sido probados en diseños DMD y AGMD, donde específicamente en el diseño AGMD, Fraunhofer ISE ha desarrollado éstos para su uso en desalinización de agua con energía solar (Figura 5.8). [8-10]

**Figura 5.8:** Diseño de membrana en espiral [9]:  
 1. Entrada fluido lado condensador, 2. Salida fluido lado condensador, 3. Entrada fluido lado evaporador, 4. Salida fluido lado evaporador, 5. Salida destilado, 6. Canal condensador, 7. Canal evaporador, 8. Lamina condensador, 9. Canal de destilado, 10. Membrana hidrofóbica.



**Figura 5.9:** Modulo de membrana en espiral, diseño Fraunhofer ISE, AGMD (Air Gap Membrane Destilation) [9].



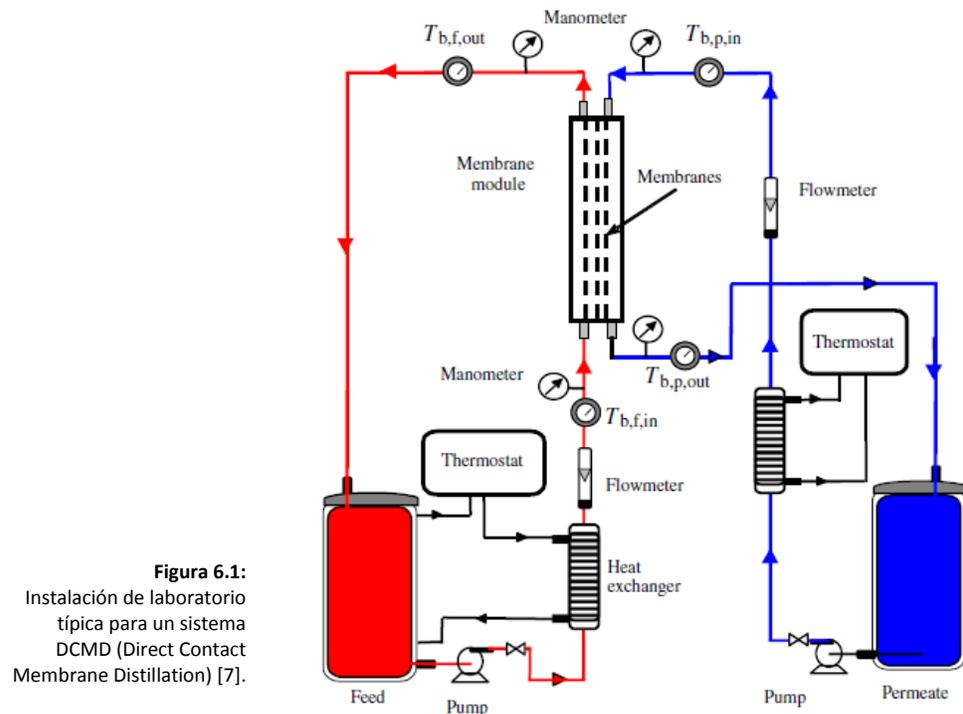
Una desventaja que presenta este diseño, corresponde a que debido a lo estrecho de los canales de circulación, existe riesgo de que se presenten incrustaciones, por lo cual se recomienda el estudio del uso de un adecuado pretratamiento para este diseño.

## 6 Estudios de Aplicaciones de Membrana de Destilación

La tecnología de membrana de destilación principalmente se ha estudiado a nivel de laboratorio. Específicamente la tecnología de **DCMD (Direct Contact Membrane Distillation)**, ha mostrado ser apropiada para Desalinización de aguas salobres, salmueras y agua de mar; Procesos de cristalización, Industria nuclear para concentración de soluciones radioactivas, desalinización y producción de agua pura; Industria textil (tratamiento de aguas residuales); Industria farmacéutica y biomédica (tratamiento de aguas residuales); Industria de alimentos, Industria química; y remoción de elementos pesados como Boro y Arsénico de soluciones acuosas.

A nivel de laboratorio se han estudiado la producción de agua altamente purificada, donde se ha logrado separar casi el 100% de electrolitos no volátiles (cloruro de sodio, cloruro de potasio, bromuro de litio, etc.), y no electrolitos (glucosa, sacarosa, fructosa, etc.) [7], presentes en soluciones acuosas; resultando un producto factible para ser utilizado en el área médica, farmacéutica y en la industria de semiconductores.

Las características del proceso abren una posibilidad de su uso en la separación de vapor y gases donde el equilibrio de la composición a cualquier temperatura es enriquecido con componentes de mayor volatilidad. Además, esta tecnología puede ser aplicada donde se requiere de una gran cantidad de rechazo de cierto componente, como lo es en la industria de tratamiento de desechos nucleares y agua para la industria de semiconductores.



**Figura 6.1:**  
 Instalación de laboratorio  
 típica para un sistema  
 DCMD (Direct Contact  
 Membrane Distillation) [7].

En los estudios realizados se ha observado que la tecnología de DCMD presenta un mayor factor de rechazo, en comparación con la Osmosis Inversa (OI). El flujo de permeado máximo obtenido hasta ahora con esta tecnología es de  $145,8 \text{ kg/m}^2\text{h}$  [7].

Además se ha observado que para sistemas DCMD, que han operado durante meses ni se ha observado un decaimiento de la cantidad de flujo permeado; sin embargo en otros estudios se ha detectado que en los primeros días de operación, el flujo de permeado ha decaído en hasta 70% [7]. Este fenómeno no se encuentra bien estudiado, por lo cual se deben realizar estudios a largo plazo para determinar el desempeño de las membranas.

El potencial de la tecnología de DCMD ha sido estudiado en el área de la agroindustria, en el tratamiento de aguas residuales [11], y también para remover agua de concentrados de fruta [12]. El procesamiento de jugos con esta tecnología presenta ventajas en comparación con otros procesos como la evaporación convencional, principalmente en términos de la calidad del producto obtenido, bajo consumo energético, y buena capacidad de escalamiento; sin embargo al poseer una gran cantidad de sólidos los estudios realizado han mostrado flujos de permeado bajos;

existiendo el riesgo de ensuciamiento de la membrana y humidificación de los poros de ésta, comprometiendo la durabilidad de la membrana.

Los sistemas DCMD han sido exitosamente aplicados al tratamiento de aguas residuales de procesos industriales, logrando obtener un fluido permeado que presenta menores riesgos al medio ambiente y que puede ser reutilizado. Se han realizado estudios en la industria textil, donde se ha probado este sistema en el flujo de rechazo, donde los colorantes, al no ser volátiles son completamente separados del flujo [13]. Adicionalmente se ha estudiado el tratamiento de aguas residuales de plantas nucleares o aguas con elementos radioactivos [14].

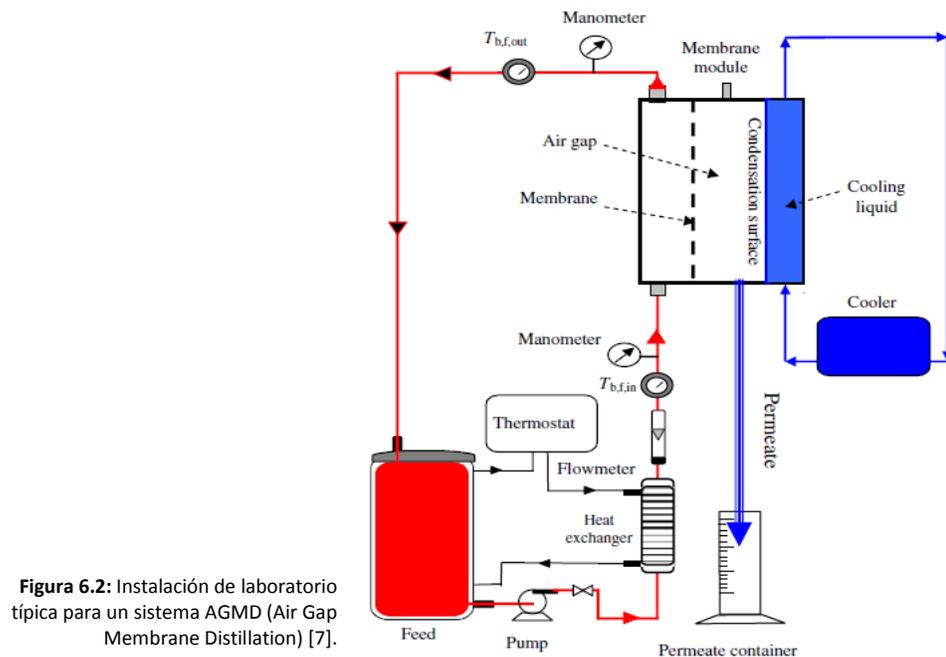
En el área de la industria de hidrocarburos, la tecnología de membrana de destilación ha resultado ser una tecnología viable para el tratamiento de agua producto de la extracción y exploración del Shale Gas, que ha sido identificado como el combustible que cambiará el mercado debido a su abundancia, disponibilidad en varias regiones del mundo y el desarrollo de una tecnología viable para su extracción. Sin embargo su proceso de extracción genera polución produciendo agua con una alta salinidad ( $> 100.000$  mg/l) y en cantidades que van desde 8.000 a 27.000 m<sup>3</sup> [15]. Estudios realizados con fluidos residuales han logrado una recuperación de 62.5% de agua.

La remoción de metales pesados es también un área donde esta tecnología posee un gran potencial, donde la tecnología dominante, la Osmosis Inversa presenta dificultades. Un ejemplo de esto corresponde a la extracción de arsénico y boro. En el caso del tratamiento de soluciones con Arsénico, se han realizado estudios utilizando membranas de fibras huecas de PVDF, logrando una remoción de hasta 99.95% de Arsénico, y el permeado producido se encontró por debajo de los límites máximos permitidos, con un flujo máximo de permeado de 20.9 kg/m<sup>2</sup>h. [16].

En el área de la biotecnología, el proceso de MD posee un alto potencial de aplicación. Esta tecnología ha sido aplicada en la remoción de elementos tóxicos de caldos de cultivo. La aplicación DCMD, conectada a un bioreactor permite la recuperación selectiva de Etanol, aumentando la productividad de éste en un 87% [17]. La tecnología MD también fue probada en la concentración de soluciones biológicas, como en el tratamiento de plasma o sangre de bovino, donde se utilizó para realizar la recuperación de agua.

Además, se ha propuesto y probado que la tecnología de MD es aplicable para la separación de soluciones azeotrópicas, las cuales no es posible separar por medio de destilación. Las pruebas fueron realizadas en la separación de ácido hidrocórico (HCl)/agua, ácido propanoico ( $C_3H_6O_2$ )/agua y ácido fórmico ( $CH_2O_2$ )/agua [18]. También se ha estudiado el uso de MD para la extracción de compuestos orgánicos volátiles, desde soluciones acuosas. El retiro de agua desde soluciones con alcohol como metanol, etanol, isopropanolol y n-butanol.

Los sistemas de destilación por membrana con capa de aire **AGMD (Air Gap Membrane Distillation)**, han sido probados principalmente en la desalación de agua, específicamente en conexión con fuentes de energía renovable como lo es la energía solar y geotérmica. Estas aplicaciones serán detalladas en el capítulo 8, “Potencial de sustentabilidad de tecnología MD”.



**Figura 6.2:** Instalación de laboratorio típica para un sistema AGMD (Air Gap Membrane Distillation) [7].

Otras aplicaciones de la tecnología AGMD, corresponden al uso en la industria de procesamiento de alimentos. Se han realizado estudios para procesos de concentración de jugos al igual que con la tecnología de DCMD, pero en escalas menores. En comparación con el proceso de Osmosis Inversa (OI), el proceso de AGMD presenta mayores flujos de permeado para soluciones de mayor concentración, en cambio para concentraciones menores el proceso de OI presenta mayores flujos de permeado [19].

En el área de tratamiento de mezclas azeotrópicas; se ha experimentado con sistemas de membrana AGMD para la separación de estas. Hasta ahora se han probado mezclas azeotrópicas como HCl/agua, y otras con compuestos volátiles orgánicos como ácido fórmico (HCOOH) y ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH). Los flujos de permeado se encuentran entre 10 y 13 kg/m<sup>2</sup>h, con porcentajes de rechazo de entre 40 a 60% [19].

Otra aplicación estudiada de esta tecnología corresponde a la concentración de HI (Yoduro de hidrogeno) y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (ácido sulfúrico), usando membranas de PTFE. Estas soluciones son utilizadas en la producción de hidrogeno. Luego de las pruebas realizadas con una solución de HI con una concentración de 0.3 mol/l, se obtuvo como producto una solución con una concentración máxima de 8 mol/l, que resulta ser mayor que la concentración azeotrópica indicando que la mezcla azeotrópica fue separada. En el caso de las pruebas realizadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se utilizó una solución con una concentración de 0,9 mol/l, obteniéndose como producto soluciones de hasta 10,1 mol/l de concentración [20].

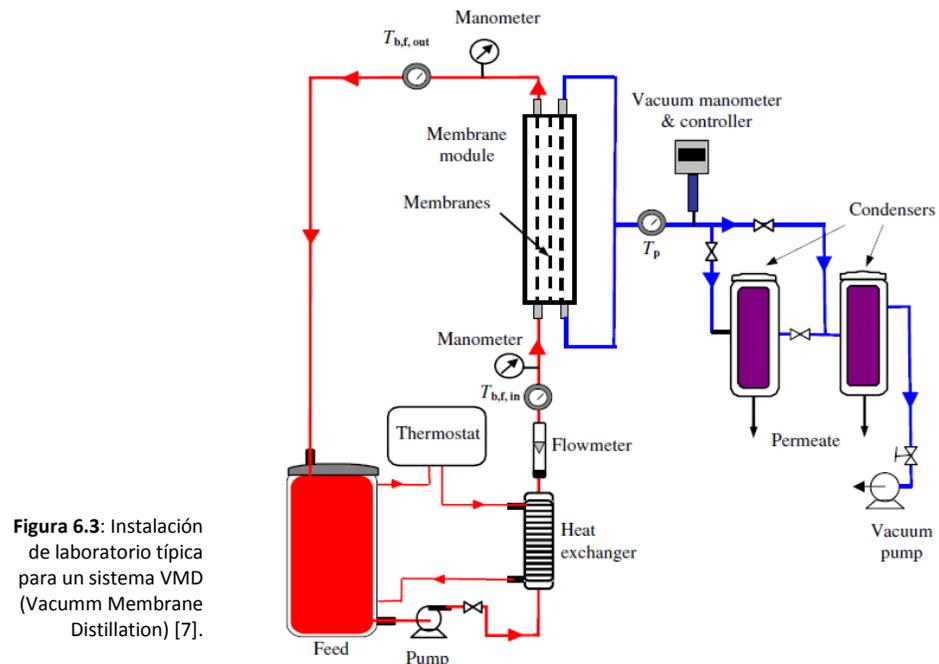
En el caso de la tecnología **VMD (Vacumm Membrane Distillation)**, se han realizado aplicaciones a nivel experimental en área como extracción de elementos orgánicos volátiles desde compuestos, tratamiento de soluciones acuosas de alcohol, concentración de jugos de fruta y recuperación de compuestos aromáticos, desalinización, tratamiento de aguas residuales de procesos textiles, entre otros. Además ha sido probada en la desalinización de agua acoplándola con fuentes de calor residual, por ejemplo para desalinizar agua en barcos utilizando el calor residual de motores [22]; esto será detallado en capítulo 8.

En desalinización, se han realizado diferentes estudios, donde el máximo flujo permeado reportado corresponde a 70 kg/m<sup>2</sup>h, cuando se ha tratado una solución con 1% en peso de sal (NaCl), a una temperatura de 85°C, y una presión de vacío de 8 a 8,8 kPa. En el permeado no se registraron trazas de sal [21].

Otra aplicación que ha sido estudiada con esta tecnología corresponde al tratamiento de aguas residuales de la industria textil [23]. La coloración de telas demanda grandes cantidades de agua y produce una alta cantidad de agua residual que es dañina al medio ambiente. Se experimentó con sistemas VMD para tratar agua con colorantes utilizando membranas de fibras de PP, con un tamaño de poro de 0,2 μm, espesor de 0,51 mm y un diámetro de 1,79 mm. El agua a tratar

presentaba diferentes concentraciones de sólidos, entre 25 y 500 ppm. La alimentación de agua se realizó a una temperatura de entre 80 y 90°C, temperatura a la que sale del proceso de coloración de telas por lo cual no fue necesario agregar energía térmica al proceso de destilación. En todos los casos estudiados el flujo de permeado se mantuvo por sobre 20 kg/m<sup>2</sup>h, y lo obtenido fue agua pura.

Finalmente la tecnología VMD ha sido probada en el tratamiento de líquidos refrigerantes empleados en la industria automotriz y aire acondicionado. Entre las típicas mezclas de refrigerantes se encuentra la mezcla de agua con glicol en concentraciones que van desde 20 a 40% en peso. De los glicoles utilizados uno de los más comunes es el glicol etileno. En el experimento estudiado se utilizaron membranas de PP, para tratar un fluido en base a Glicol Etileno (20 a 60% en peso) y agua destilada, a una temperatura de entre 40 a 60°C y a una tasa de 0,3 a 0,8 l/min. El desempeño de la membrana fue constante durante 30 días [24].



**Figura 6.3:** Instalación de laboratorio típica para un sistema VMD (Vacuum Membrane Distillation) [7].

La tecnología **SGMD (Sweeping Gas Membrane Distillation)** ha sido probada a nivel de laboratorio en el tratamiento de soluciones acuosas conteniendo elementos no volátiles como sales, así también con

soluciones que contienen componentes volátiles como amoníaco, alcoholes (etanol, isopropanolol) y acetona. El uso de esta tecnología con fuentes energéticas sustentables aún no ha sido estudiado.

Uno de estos estudios contemplo la desalinización de agua utilizando una configuración de módulos de membranas con tubos y coraza, y con membranas de PP. Se utilizó aire húmedo como gas de transporte del vapor de agua. Finalmente se detectó que el rechazo de sal (NaCl) fue de un 99,9% [25].

Otra aplicación de esta tecnología corresponde al tratamiento de soluciones con compuestos volátiles como el amoníaco. Se utilizó una solución con 100 mg/l de amoníaco, y se utilizó aire comprimido como gas de transporte de destilado. Finalmente se encontró que en una condición de alimentación de a alta temperatura y con una alta cantidad de aire comprimido, se logra un 97% de remoción de amoníaco, es decir un flujo de permeado con una concentración de amoníaco de 3,3 mg/l [26].

## 7 Potencial de sustentabilidad de tecnología MD

Las características del proceso de membrana de destilación, hacen que posea importantes ventajas para ser acoplado a fuentes de energía renovable como por ejemplo energía solar o geotérmica; y además de poder utilizar el calor residual de procesos industriales. Dentro de estas ventajas se consideran la temperatura de operación que va desde 50 a 80°C, poder tratar soluciones de mayor concentración de sales, y poder operar a presiones menores que otras tecnologías de desalinización. Además, posee la ventaja de poder operar intermitentemente lo que provoca un menor daño en las membranas y requiere de una menor cantidad de agentes químicos para su operación, específicamente en el pre tratamiento. La tabla 7.1, muestra los diferentes desarrollos de plantas piloto de membrana de destilación que operan con energía solar, en diferentes etapas de desarrollo.

**Tabla 7.1:** Desarrollos de membrana de destilación acoplado con energía solar [5].

Sistema	Área Colector (m <sup>2</sup> )	Capacidad	Flujo	Aplicación
Piscina Solar + AGMD	2,94	-	6 kg/m <sup>2</sup> h	-
Colector plano + MD fibra hueca	3	50 l/día	17 l/m <sup>2</sup> dia	-
Colector plano + VMD de tubo	12	40 l/h	-	-
Colector plano + MD espiral	10	100 l/día	-	Agua salobre
Colector solar + VMD fibra hueca	8	-	32,2 kg/m <sup>2</sup> h	Agua subterránea
Colector Solar Parabólico	-	-	71 kg/m <sup>2</sup> h	Agua de mar

### 7.1 Membrana de Destilación y Energía Solar

Esta tecnología es factible de utilizar con energía solar, especialmente en zonas de escasas hídrica y con gran cantidad de radiación solar. Un diseño propuesto incluye colectores solares, tanque de almacenamiento, intercambiador de calor y los módulos de membrana; a lo cual se agregan paneles fotovoltaicos para cubrir el consumo eléctrico del sistema. En este ámbito de desarrollo se ha estudiado que los costos inversión son una limitante, sin embargo cuando el sistema entra en funcionamiento los costos de operación son mínimos.

Han existido estudios de plantas piloto desarrolladas acoplando el proceso de MD con energía solar, pero siguen siendo menores en comparación con las plantas instaladas de Osmosis Inversa con impulsadas por energía solar.

Fraunhofer ISE (SMADES Project), ha realizado la instalación de diferentes plantas piloto, en lugares como Jordania, Egipto, Marruecos y tres en España (Islas Canarias). La tecnología de membrana utilizada corresponde a AGMD en configuración de membrana en espiral, con membranas de PTFE. Cada unidad instalada consta de colector solar, paneles fotovoltaicos, estanque acumulador de destilado y agua salobre, bombas, instrumentación y control. Los módulos de membrana utilizados (Figura 7.1). [27]

Los módulos de membrana utilizados corresponden a módulos de membrana en espiral, de 300 a 400 mm de diámetro, y de 450 a 800 mm de alto. En cada uno de los módulos de membrana, el área efectiva de esta en el rango de 7 a 12 m<sup>2</sup>, y el consumo térmico específico va desde 100 a 200 kWh/m<sup>3</sup>[27].

Una de estas plantas, específicamente la instalada en Jordania, se encuentra en operación desde el año 2005, tratando aguas salobres. Se instaló en este prototipo, un colector solar de 5,73 m<sup>2</sup> y módulo PV para funcionamiento autónomo. Durante este periodo de operación ha producido agua pura a tasas de 120 l/día, con una conductividad de 5 µS/cm, con un requerimiento térmico de 200 a 300 kWh/m<sup>3</sup> [7]

**Figura 7.1:**  
 Planta piloto de Membrana de Destilación acoplada con energía solar, diseño Fraunhofer ISE, AGMD (Air Gap Membrane Distillation) [28].



La instalación realizada en Islas Canarias, se utilizó el mismo diseño de membranas (Membranas en espiral, proceso AGMD), con una capacidad de diseño máximo de 1600 l/día de destilado, colectores solares de 90 m<sup>2</sup>, y paneles fotovoltaicos de 1,92 kWp. Al igual que la planta

anteriormente indicada, ésta también opera desde el año 2005. En su operación han registrado flujos de 415 l/h con un máximo de temperatura de entrada de fluido de 85°C; con lo cual la cantidad máxima de destilado registrada fue de 15 l/h. En Pantelleria, cerca de Sicilia, una planta que utiliza calor residual proveniente de generadores Diesel funciona 24 horas al día. Las capacidades de estas plantas MD llegan a 5 m<sup>3</sup> / día por el momento. [28].

Otro desarrollo corresponde al realizado por el consorcio holandés **Memstill**, que desarrollaron tres plantas piloto para desalinizar agua de mar, con una producción nominal de 0,5 a 1 m<sup>3</sup>/h. La primera planta fue instalada en Singapur, y las otras dos fueron instaladas cerca del puerto de Róterdam. Dichas plantas consideraron y proceso de membrana AGMD, con áreas de membrana de hasta 300 m<sup>2</sup>. El consumo térmico registrado esta entre 56 a 100 kWh/m<sup>3</sup>, y el consumo eléctrico se ha estimado en 0,75 kWh/m<sup>3</sup> [5].

**Figura 7.2:** (der.)Planta piloto de Membrana de Destilación acoplada, diseño Memstill, AGMD. (izq.) Concepto de operación del proceso de destilación por membrana Memstill [5].

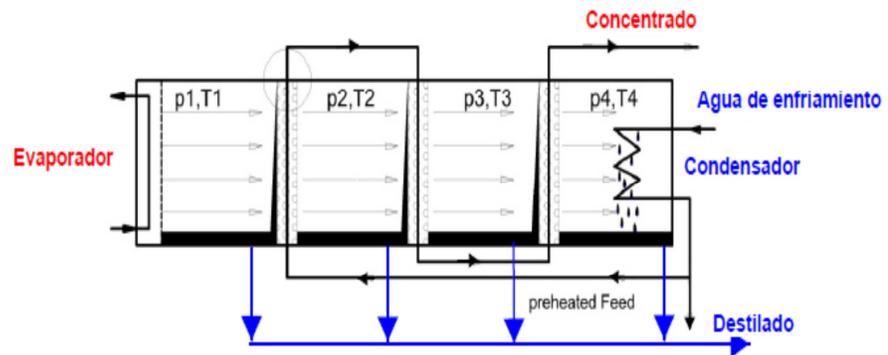


Otro desarrollo importante es el impulsado por la compañía **Memsys**, que han planteado un sistema de fibras huecas VMD de múltiples etapas (V-MEMD), impulsado por energía solar y con una capacidad de 1 m<sup>3</sup>/día, instalado en Singapur. Los datos técnicos de este sistema indican valores de consumo eléctrico de entre 0,75 y 1,75 kWh/m<sup>3</sup>, consumo energético de entre 175 a 350 kWh/m<sup>3</sup>, y con una temperatura de operación de entre 60 y 100 °C, y una temperatura en el lado frio de 40°C [5].

Los módulos propuestos son de 330 x 700 x 480 m, con 3,5 m<sup>2</sup> de área útil considerando membranas y membranas de condensación. La

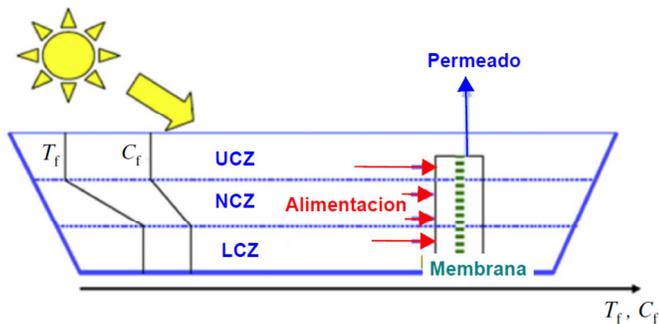
membrana es fabricada con PTFE y las membranas de condensación son hechas en metal recubierto con PP (Polipropileno). Los flujos reportados por Memsys se encuentran entre 6,8 a 9,5 kg/m<sup>2</sup>h. El modulo actualmente tiene una capacidad de 50 m<sup>3</sup>/día, y se encuentra en etapa de comercialización [5].

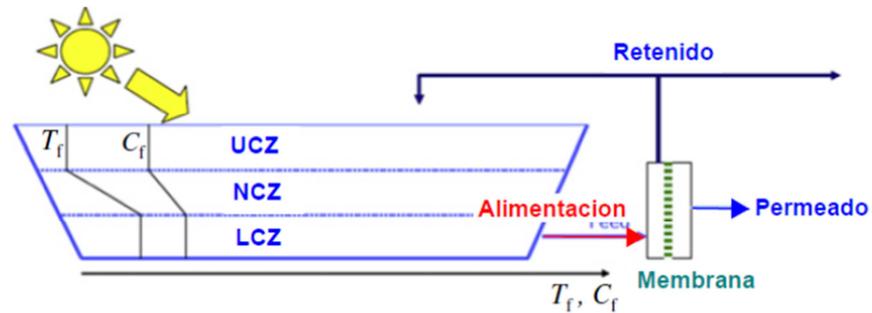
**Figura 7.3:** Esquema concepto de V-MEMD: Membrana de destilación con Vacío Multietapas (Memsys) [5].



En cuanto al uso de energía solar para procesos de MD también se han realizado conceptos, a nivel de estudio y experimental, de acoplar sistemas de membranas a piscinas y colectores solares. Recientemente en Estados Unidos se ha estudiado acoplar un sistema DCMD con una piscina solar (Salt Gradient Solar Pond - SGSP), que consiste en un volumen de agua con una profundidad de entre 2 y 5 metros que posee un gradiente de salinidad según su profundidad. El volumen cercano a la superficie se denomina Zona de Superficie Convectiva; el siguiente estrato o volumen se denomina Zona No Convectiva y la de mayor profundidad, Zona de Baja Convectividad [7].

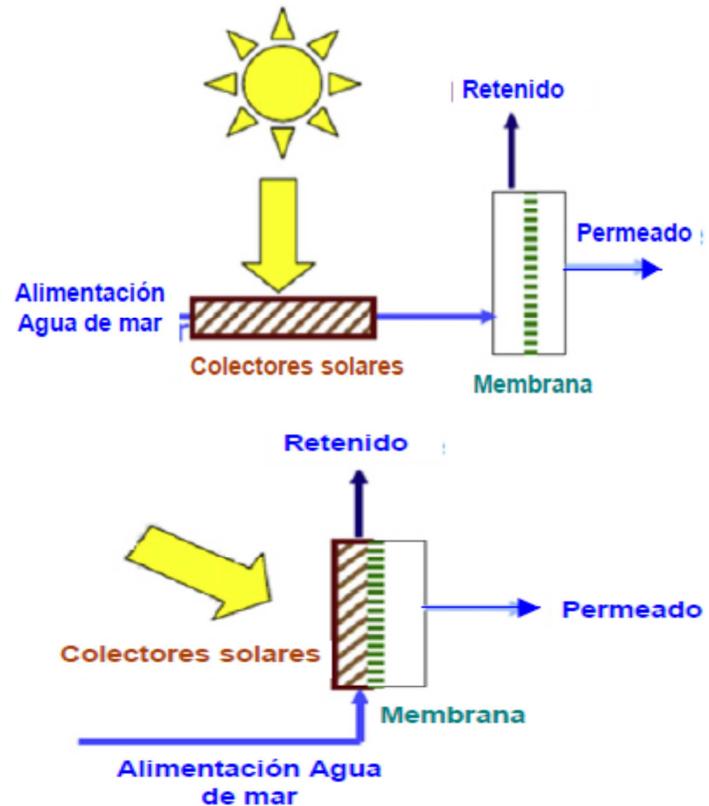
**Figura 7.3:** Configuración de membrana de destilación acoplado a piscinas solares [7].





La membrana se consideró con dos alternativas de instalación, una donde se precalienta el flujo de alimentación en la piscina y luego se ingresa al módulo de membrana, y el otro donde la membrana se inserta en la piscina acoplándose directamente con la fuente energética. En este estudio se consideró una membrana de PTFE de  $0,45 \mu\text{m}$  de tamaño de poro, y una porosidad de 89%. Los canales poseían un diámetro de 50 mm de ancho, 3 mm de alto y 200 mm de largo. La concentración de sales en la alimentación estuvo entre 50 a 75 g/l [7]. El calor es extraído de la Zona de Baja Convectividad, y transferido a la solución por medio de un intercambiador de calor. Se observó que la mayor cantidad de flujo permeado se logró con una temperatura de alimentación de  $53,9^\circ\text{C}$  y 10% de salinidad. Este sistema propuesto puede producir hasta  $1,6 \text{ l/día/m}^2$  [7]. También se han estudiado, a nivel de simulación, otras tecnologías para ser acopladas a piscinas solares, como AGMD y VMD.

En el caso del estudio realizado para acoplar los sistemas de membrana a Colectores Solares (SC), se consideraron dos configuraciones una que ubica al colector y membrana como un equipo integrado y otro donde los colectores y membrana se encuentran separados. Tanto las configuraciones de con piscinas solares y colectores solares fueron analizadas desde el punto de vista de consumo energético, factibilidad técnica, mantención y operación.



**Figura 7.4:** Configuración de membrana de destilación acoplado a colectores solares [7].

Finalmente el análisis concluye que el uso de colectores solares presenta mayores flujos de permeado, hasta  $142 \text{ l/m}^2\text{h}$ , considerando una presión de  $500 \text{ Pa}$ , con sistemas de membrana VMD [7]. Se reportó finalmente que una planta piloto de este tipo se instaló en Túnez con colectores solares planos.

## 7.2 Membrana de Destilación asociado a procesos

Se han realizado estudios enfocados en el aprovechamiento de calor residual desde procesos industriales, con lo cual se busca la recuperación de agua para ser utilizada en procesos, disminuyendo además la cantidad de residuos propios de cada proceso.

Una de estas iniciativas fue impulsada por las empresas suecas X-Zero y Scarab (proveedor de membranas), que buscaba utilizar la tecnología de membrana de destilación (AGMD), para ser utilizada en plantas térmicas para el tratamiento de condensado de gas de combustión y en el tratamiento de aguas municipales de calefacción, para separar componentes farmacéuticos después del tratamiento biológico de estas aguas de residuales.

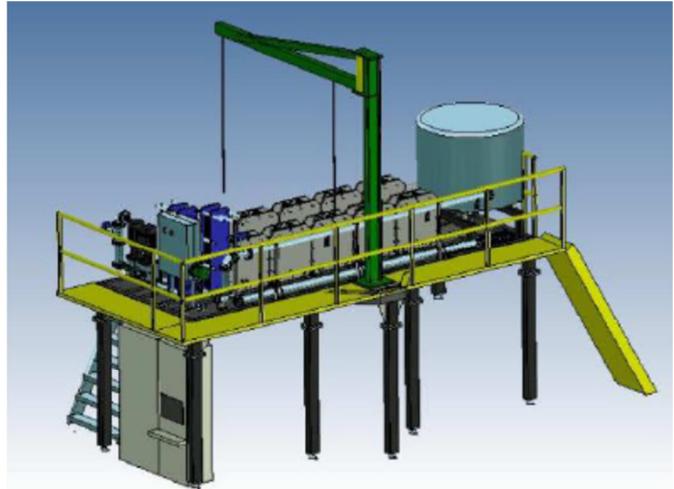
El piloto propuesto consideró un sistema tipo AGMD, con 10 módulos de membrana en configuración marco y placa (Figura 7.5). Cada módulo de placas posee un área de  $2,3 \text{ m}^2$ , 9 canales de alimentación y 9 canales de enfriamiento. La membrana utilizada fue de PTFE con un tamaño de poro de  $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ , espesor de  $0,2 \text{ mm}$  y una porosidad de 80%. Las pruebas operativas se realizaron por más de 300 horas o aproximadamente 40 días de operación intermitente, pues el sistema de membrana no fue operado durante la noche. El calor fue obtenido de la red de calefacción distrital.

En el caso del tratamiento de condensado de gases de combustión, que fue obtenido de una planta térmica de ciclo combinado, se obtuvo un flujo de permeado de 9,5 a 10 l/h, por módulo, considerando una temperatura de alimentación de 60 a  $63^\circ\text{C}$ , y una temperatura de lado de enfriamiento de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  [29]. En el flujo de condensado de gases existían elementos como Mercurio, Calcio, Hierro, Potasio, Magnesio, Sodio, Azufre, Aluminio, Arsénico, Cobre, Cromo, Manganeso, Zinc, Amoniaco, entre otros. En los ensayos, todas las muestras fueron pretratadas por medio de filtros de cartuchos de 10 a  $0,5 \text{ }\mu\text{m}$ . Luego de los ensayos se concluyó que los elementos presentes en el fluido disminuyeron en más de un 99% y provocó una alta disminución en Amoniaco después de realizar un ajuste del pH de la solución.

El segundo caso de estudio fue realizado en el tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Estocolmo, Suecia; para remover componentes farmacéuticos y obtener agua purificada. Estas aguas ingresan al sistema de membrana luego de ser pre-tratadas con sistemas biológicos estándares, incluyendo además sistemas de sedimentación y pre-filtrado con filtros de cartucho de  $10 \text{ }\mu\text{m}$ .

El flujo de agua a ser tratada fue ingresado al sistema de membrana en dos valores de temperatura,  $58$  y  $73^\circ\text{C}$ , y con una temperatura fija de  $16^\circ\text{C}$  por el lado enfriador. Bajo estas condiciones el flujo de permeado fue de 9,25 y  $12,4 \text{ l/m}^2\text{h}$ , respectivamente [29]. Otro escenario planteado fue con un flujo de alimentación a  $82^\circ\text{C}$ , con lo cual se obtuvo un flujo de permeado de entre  $11,5$  a  $12,6 \text{ l/m}^2\text{h}$  [29]. Luego de los análisis de los flujos de permeado obtenidos, se detectó que la mayoría de los residuos farmacéuticos, a niveles bajo los de detección. El tratamiento de flujos mayores requerirá de un aumento considerable de área de membrana, pero para flujos menores la tecnología de membrana de destilación es factible. Junto a lo anterior se deberá

desarrollar un concepto para el manejo y tratamiento del fluido concentrado obtenido del proceso de membrana.



**Figura 7.5:** Planta piloto de Membrana de Destilación AGMD (Diseño Xzero) [29].

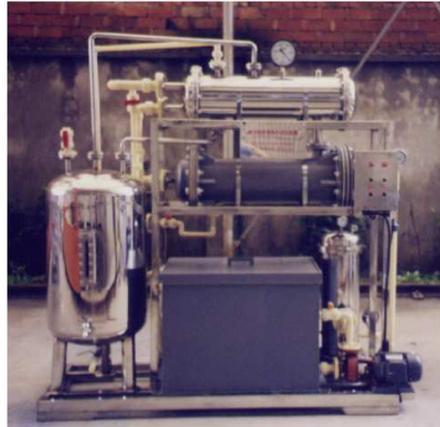
Para un flujo máximo de 1200 l/h, el consumo eléctrico específico se calcula en un rango de 0.35-0.65 kWh/m<sup>3</sup>. La demanda de calor se encuentra entre 100 a 700 kWh/m<sup>3</sup> [29]. Estas demandas son mayores que las requeridas por sistemas como la osmosis inversa (OI), sin embargo el proceso de membrana de destilación utiliza gran parte de la energía en forma de calor, con lo cual este sistema sigue siendo una alternativa atractiva utilizando calor de rechazo, y cuando se configura el sistema con recuperación interna de calor, utilizando el calor residual en el flujo de enfriamiento.

Un equipo piloto con un sistema VMD (Vacuum Membrane Distillation) ha sido probado para la desalinización de agua de mar en buques, utilizando módulos fabricados en PVC con fibras huecas de PP, con diámetro interno de 327  $\mu\text{m}$  y un espesor de 52  $\mu\text{m}$ . Durante su operación el agua de mar fue calentada utilizando el calor residual de los motores del buque. Se concluyó que la reducción de sólidos en el agua (TDS) fue de 99,99%, con un flujo de permeado máximo de 5,4 kg/m<sup>2</sup>h (66 kg/h de agua desalada). La alimentación de agua de mar fue establecida en 500 l/h, a una temperatura de 55°C. Luego de 5 meses de operación, la planta piloto mantuvo sus niveles de desalación y flujo de permeado [22].

### 7.3 Membrana de Destilación y Geotermia

El uso de la tecnología de MD acoplado con energía geotérmica no ha sido ampliamente desarrollado. A nivel experimental se ha intentado acoplar un sistema de membrana tipo AGMD con un cristizador de lecho fluidizado como alternativa para remover metales y minerales, y desalinizar agua salada.

**Figura 7.6:** Planta piloto tecnología VMD (Vacuum Membrane Distillation), y montaje en buque [22].



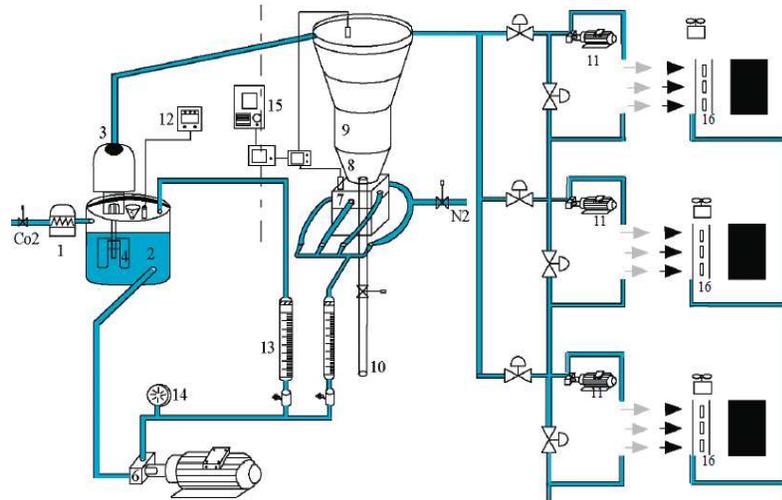
Este trabajo experimental fue realizado en Túnez donde existen sitios geotérmicos en zonas de escasas hídrica. En estas áreas se han realizado esfuerzos para recuperar el recurso hídrico geotérmico, para su uso en agricultura y para alimentar plantas de osmosis, por medio de la instalación de torres de enfriamiento de manera de bajar la dureza y temperatura de esta agua; sin embargo esto resultó en sistemas de baja eficiencia térmica y que presentan incrustaciones en las líneas de transporte.

El experimento consideró un pretratamiento por medio de un cristizador con lecho fluidizado, donde precipita el carbonato de calcio debido a la reducción de presión y pérdida de dióxido de carbono que se presenta debido a que el fluido geotérmico pasa del pozo a un volumen cerrado. En el proceso de desalinización se utilizaron tres módulos AGMD montados en formato marco y placa, donde cada módulo constaba de dos celdas instaladas de forma paralela.

La configuración considera que la producción de fluido obtenido del proceso de cristalización se almacene en un estanque termostático para luego, por medio de una bomba peristáltica circule a través de las membranas (Figura 7.7).

El flujo ingresado al sistema tenía una temperatura de 40 a 70 °C, y una concentración de sales de 3 a 35 g/l, permaneciendo constante su conductividad térmica en 6  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La conversión de agua total fue de 25%. Luego del análisis experimental se determinó que el consumo energético para producir 1 kg de agua fue de 111 kJ, y que el costo del agua purificada fue de 0,13 \$/l [30].

**Figura 7.7:** Esquema de proceso de desalinización de fluido geotérmico, con tecnología de membranas AGMD (Air Gap Membrane Distillation) [30].  
 Descripción: 1. Resistencia, 2. Tanque de alimentación, 3. Motor, 4. Impulsor, 5. Válvula de presión, 6. Bomba, 7. Orificio Vórtice, 8. Columna Cónica, 9. Columna Cilíndrica, 10. Salida granulado, 11. Bombas, 12. Medidor de PH, 13. Medidor de flujo, 14. Manómetro, 15. Manómetro diferencial, 16. Membranas (sistema AGMD).



Finalmente, de este estudio se observa preliminarmente que para desalinizar exitosamente fluidos geotérmicos se deben complementar procesos. Sin embargo en cuanto al proceso de membrana de destilación, se observa que para lograr altas tasas de producción de agua purificada se requiere más que el calor sensible aportado por el fluido geotérmico. En este contexto existen posibilidades para mejorar la operación de las membranas, una de ellas considera utilizar energía solar y la segunda considera acoplar otros procesos de separación por membrana, por ejemplo Osmosis Inversa (OI), aumentando la tasa de producción de agua purificada.

En el desarrollo de la tecnología requiere de mayores estudios multidisciplinarios, considerando pruebas de sistemas híbridos (Cristalización, MD y OI), y tomando en cuenta impactos ambientales como de donde se debe disponer de la descarga de la salmuera concentrada.

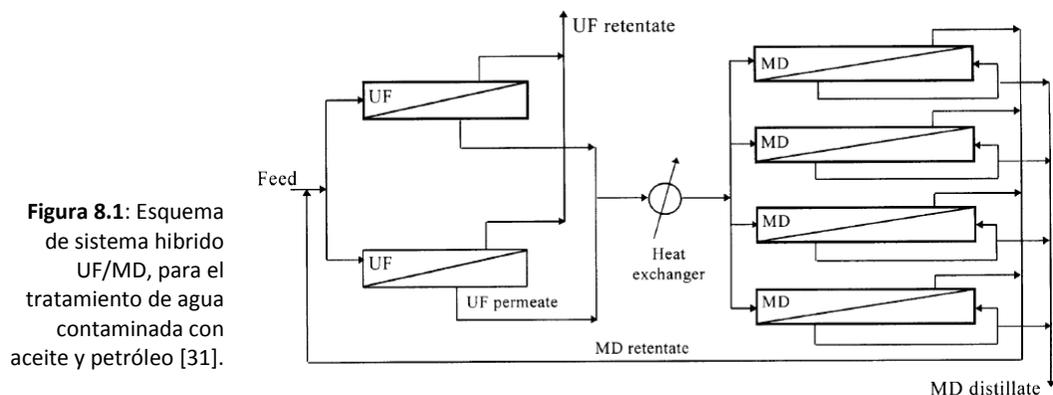
## 8 Sistemas Híbridos de MD

En general los sistemas híbridos son constituidos por más de una tecnología, interconectadas en una configuración definida para optimizar un resultado definido. En este caso una de las unidades corresponderá a la tecnología MD, en combinación con otras tecnologías de membrana (Osmosis Inversa, OI; Nanofiltración, NF; Ultrafiltración, UF; Microfiltración, MF, biorreactores, etc.); o con sistemas de separación como destilación, precipitación, cristalización, fotocatalizadores, etc.)

El objetivo es desarrollar sistemas con mayor eficiencia, productividad y calidad, disminuyendo el uso energético, mejorando de esta forma los costos asociados, ya sea de inversión y operación; y disminuir emisiones contaminantes al ambiente. Actualmente los sistemas de MD están en proceso de optimización al encontrarse en una etapa de desarrollo a nivel de laboratorio y en algunos casos en plantas piloto.

Una de las aplicaciones de los sistemas híbridos MD es en combinación con otros sistemas de membranas, impulsados por la presión del fluido a tratar. El objetivo de esta configuración es aumentar la concentración de los rechazos, aumentando la recuperación, aumentando la producción del sistema, reduciendo de paso el impacto ambiental de la instalación.

En este ámbito se han realizado estudios integrando sistemas MD con UF (Figura 8.1), para el tratamiento de aguas de desecho industrial con residuos aceite y petróleo (agua de sentinas). Los resultados experimentales del sistema UF/MD, se observan en la siguiente Tabla 8.1.



**Tabla 8.1:** Resultados experimentales sistema UF/MD [31].

Muestra de Agua	Concentración (mg/l)			Rechazo (%)		
	Aceite	TOC*	TDS**	Aceite	TOC	TDS
Agua de sentina	360	400	3790	-	-	-
Permeado UF	4,9	8,6	3700	98,64	97,85	2,4
Permeado UF/MD	0	1,8	1,4	100	99,55	99,96

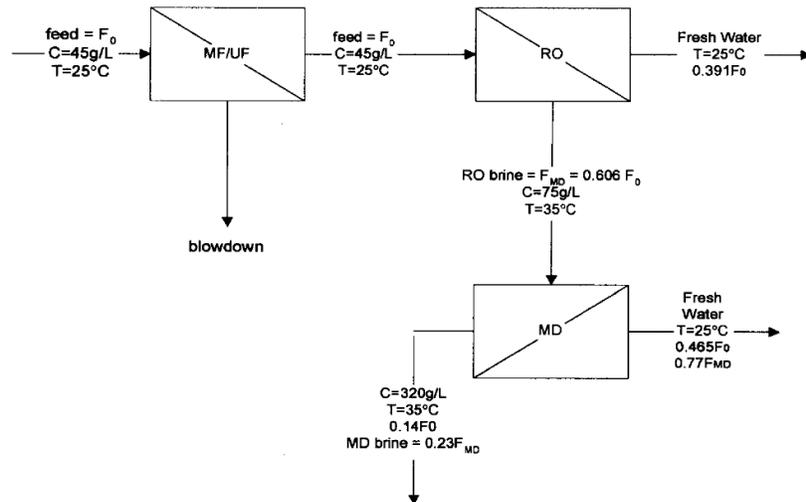
\*TOC: Total Organic Carbon (Carbón orgánico total).

\*\*TDS: Total Disolved Solids (Solidos disueltos totales).

Otra aplicación estudiada corresponde a sistemas híbridos de OI/MD. Este sistema fue planteado para el tratamiento de agua de mar con una concentración de sal de 45.000 mg/l y una temperatura de 25°C. Previo al proceso de Osmosis Inversa, el flujo es pre-tratado con por medio de MF/UF [32]. Los flujos de agua recuperada se registraron entre 2,4 y 1,4 kg/m<sup>2</sup>h. El factor de recuperación de agua en la unidad MD fue de 77%, mientras que para la unidad OI fue de solo 40%. Al acoplar ambas tecnologías el factor de recuperación total ascendió a 87,6%.

En cuanto a los costos detectados de esta integración OI/MD, y considerando una planta de 26.000 m<sup>3</sup>/d, el costo de agua producida es de 1,25 \$/m<sup>3</sup> considerando el sistema híbrido.

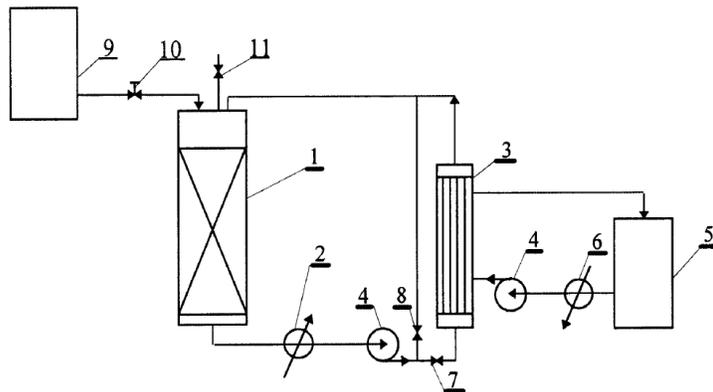
Los sistemas híbridos de MD también han sido testeados en procesos de fermentación. Un ejemplo de esto es lo realizado para la producción de etanol en biorreactores a partir de la fermentación de azúcar. El sistema propuesto se muestra en la figura 8.3. La solución de fermentación consta de azúcar, agua, nitrógeno, fosforo y levadura. El paso del caldo del biorreactor por el sistema MD, específicamente DCMD, aumenta la eficiencia en el biorreactor en la producción de etanol; al remover selectivamente elementos volátiles presentes en el producto o caldo obtenido del biorreactor. Durante la prueba no se observó una baja en la permeabilidad de las membranas lo que indica que las células de levadura presentes en el caldo del biorreactor no se depositan o incrustan en las membranas.



**Figura 8.2:** Esquema de sistema híbrido OI/MD, para desalinización de agua [33].

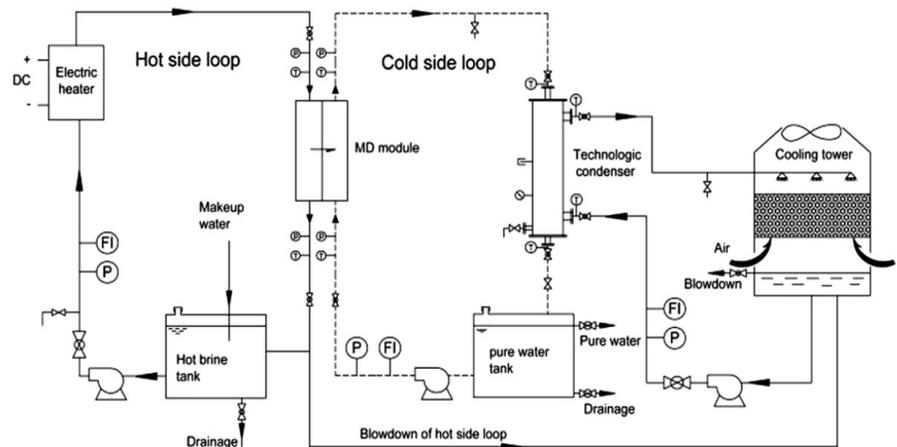
El caldo del birreactor sale de este a una temperatura de 34°C por lo cual se requirió de un intercambiador de calor para subir su temperatura hasta 40°C. El sistema de fermentación sin sistema de MD posee una productividad de 2,6 g EtOH/dm<sup>3</sup> con una eficiencia de 50%; y con sistema MD la productividad ascendió a 5,5 g EtOH/dm<sup>3</sup>, y una eficiencia de 95%.

**Figura 8.3:** Esquema de sistema híbrido fermentación / DCMD [33]: 1. Bioreactor, 2 y 6. Intercambiadores de calor, 3. Módulo DCMD, 4. Bomba, 5. Estanque de destilado, 7 y 8. Válvulas, 9. Estanque de solución de azúcar, 10. Válvula de control, 11. Válvula de venteo.



Los sistemas MD además pueden ser acoplados a sistemas de enfriamiento de carácter re-circulatorio, aprovechando el flujo de agua fría de este circuito para generar la diferencia de temperatura que requiere el sistema MD para operar. Existe un estudio a nivel de laboratorio que acopló un sistema DCMD a un sistema de enfriamiento tradicional, para producir agua pura; utilizando membranas de fibras huecas de PVDF con una rea efectiva de 2 m<sup>2</sup> [33]. Se observó la relación

directa del flujo de agua pura producido, con la cantidad de fluido que pasa por ambos lados de la membrana y además con la diferencia de temperatura entre ambos flujos. Al aumentar el flujo del lado caliente, de 12 a 30 l/min, se incrementa el flujo de permeado en un 40,8%; y aumentando el flujo del lado frío de 20 a 100 l/min, se incrementa el flujo de permeado en 22,4%. La configuración planteada en esta experiencia corresponde a la figura XX.



**Figura 8.4:** Esquema de sistema experimental híbrido DCMD y Sistema de enfriamiento de planta [34].

## 9 Costos de tecnología MD

En general no existe gran cantidad de estudios referente al aspecto económico y de costos en procesos de membrana de destilación, debido principalmente porque aún no existe una aplicación a escala comercial de esta tecnología. Se entiende que en los primeros años de desarrollo de esta tecnología, los costos eran elevados principalmente debido al costo de los materiales utilizados y al bajo desarrollo de los métodos de fabricación de membranas. A pesar de lo anterior, se ha observado que los costos de desalinización por membrana han bajado durante los últimos años principalmente debido al desarrollo tecnológico en los procesos de fabricación de membranas, desarrollo de nuevos materiales y la competencia generada por la entrada de nuevos actores de la industria.

Actualmente los costos de producción de agua (WPC, Water Production Cost) típicos en plantas de desalación, cualquiera sea la tecnología, se encuentran por debajo de 1 \$/m<sup>3</sup> si se consideran plantas de gran escala, y en el rango de 1 a 3 \$/m<sup>3</sup>, para plantas de menor escala [7].

El proceso de Membrana de Destilación al ser impulsado térmicamente posee un potencial de reducción de costos al poder utilizar calor de fuentes renovables o utilizar calor residual de procesos existentes; sin embargo existen factores influyentes como capacidad de la planta, aplicación, calidad del agua a tratar y calidad de agua requerida, pretratamiento y disposición de residuos; etc., que determinan los costos y condiciones de escalamiento de esta tecnología en instalaciones de mayor tamaño.

En cuanto a los costos de inversión de los proyectos de desalación, se observa que los proyectos que utilizan energía solar son de una alta inversión inicial en comparación con los que utilizan fuentes de energía convencional; sin embargo presentan mayores costos de operación y mantención. Además, se debe considerar que en zonas remotas donde no hay acceso a energía de la red eléctrica y existe una dificultad para transporte de combustibles, la alternativa de desalinización utilizando energías renovables como solar y geotérmica, se convierte en una alternativa favorable.

Uno de los factores importantes que afecta a la estimación de costos de inversión de la tecnología de membrana de destilación, es que no existe

una producción comercial de módulos de membrana confiables, tanto para trabajo en laboratorio y a escala industrial.

## 9.1 Costos de Inversión, Operación y Mantenimiento de plantas de MD

Los **costos de inversión** de los sistemas de Membrana de Destilación (MD) están representados por los costos de equipos, construcción y montaje, además de los costos asociados a estas actividades como costos de ingeniería, puesta en marcha (pre-comisionamiento, comisionamiento y confiabilidad), terreno, costos administrativos y legales. Entre los factores que afectan estos costos, se cuentan:

- Capacidad de planta.
- Ubicación del proyecto.
- Calidad y variabilidad del agua a ser tratada.
- Ubicación relativa de plantas de generación eléctrica.
- Características de los puntos de toma y rechazo de aguas.
- Configuración de la planta.
- Medidas de mitigación ambiental.
- Calidad de agua requerida.
- Distancia de planta a punto de consumo y punto de extracción de agua a tratar.

Una importante parte del costo de inversión de este tipo de plantas se encuentra reflejado en equipos principales como módulos de membrana, intercambiadores de calor y sistemas de pretratamiento. A estos costos de equipos se suman instalaciones y sistemas necesarios para el correcto funcionamiento de la planta, como por ejemplo sistemas de captación y almacenamiento de agua a tratar, disposición de agua de rechazo, disposición, almacenamiento e impulsión de agua tratada hacia el punto de consumo.

Para estimar el monto de inversión de una planta de MD, se pueden utilizar factores de escalamiento, ya sea para estimar cada uno de los componentes por separado o si se conoce el costo de una planta completa se puede estimar por medio un factor de escalamiento para plantas de desalinización, el cual se considera en 0,8 [35].

En el caso de la estimación del costo de membranas utilizadas, en estudios recientes se indican valores de 36 \$/m<sup>2</sup> hasta 90 \$/m<sup>2</sup> [7], dependiendo del tipo de membrana (tamaño de poro, material, etc.), compañía y calidad del producto, y también de la cantidad adquirida. Sin

embargo, el valor de las membranas de PVDF y PTFE comercial fue de 300 y 800 \$/m<sup>2</sup> para experiencias en laboratorio.

Otro factor que influye en la determinación del costo de inversión de una planta MD es el pretratamiento al cual debe ser sometida el agua antes de entrar en el proceso, que se encuentra sujeto a la calidad del agua. Las incrustaciones en las membranas se dan principalmente por partículas orgánicas e inorgánicas. Dentro de los sistemas de pretratamiento se encuentran sistemas de filtración, adición de floculantes y anti-incrustantes, y cloración. Debido a la variedad de métodos y de calidades de aguas a tratar, los costos del pretratamiento pueden ir desde 150 a 450 \$/m<sup>3</sup> día.

En general no existe mucha información especialmente en lo referido a los módulos de membrana, pues estos aún no han sido desarrollados a escala comercial. Una estimación del costo total de una planta con tecnología MD, se muestra en la siguiente tabla, considerando diferentes estudios realizados a la fecha.

**Tabla 9.1:** Costo de Inversión para plantas de desalinización con tecnología MD.

Tecnología	Capacidad [m <sup>3</sup> /d]	Costo Inversión [USD]	Costo Inversión específico [\$/ (m <sup>3</sup> /d)]	Ref.
DCMD (Desalinización agua de mar)	24.000	27.321.033	1.180	[35] 2008
VMD (Retiro de componentes volátiles orgánicos)	76	247.000	3.250	[36] 1992
DCMD (Sistema híbrido con sistema de enfriamiento)	50	280.000	5.600	[34] 2008

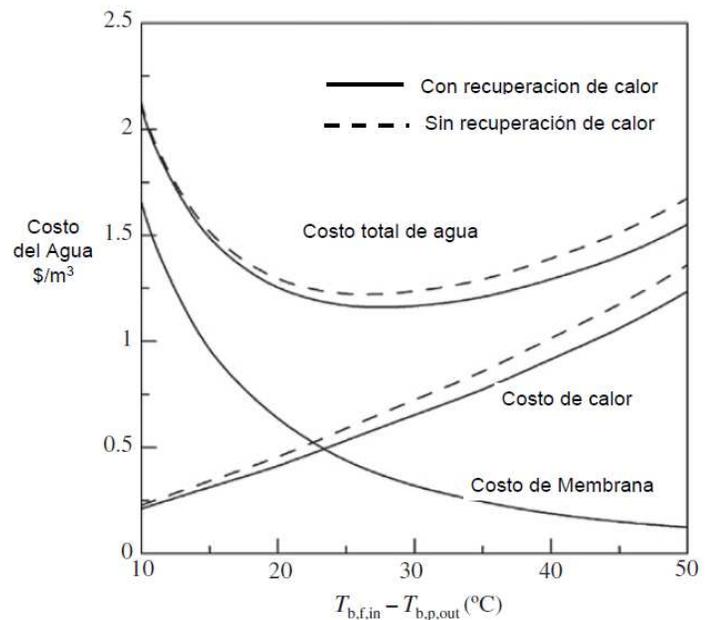
Los **costos de operación y mantenimiento (O&M)** en plantas desaladoras dependen generalmente de los siguientes factores:

- Consumo de energía (eléctrica, térmica, etc.)
- Calidad del agua (aditivos químicos, pre-tratamiento, post-tratamiento requerido)
- Reemplazo de equipos y repuestos (membranas, filtros pre y post tratamiento, bombas, instrumentos, válvulas, disposición y tratamiento de residuos, etc.)
- Mano de obra (operación y mantención)

El análisis de costos de O&M, finalmente se traduce en la obtención del costo de cada unidad volumen de agua pura producida (\$/m<sup>3</sup>), o lo que se denomina WPC, por su sigla en inglés, "Water Produced Cost." Actualmente el costo de agua producida por plantas de desalinización,

en general, está en el orden de 1  $\$/\text{m}^3$  para instalaciones de gran escala y desde 1 a 3  $\$/\text{m}^3$ , para instalaciones de menor escala [7].

Los estudios y plantas piloto de tecnología MD, realizados a la fecha presentan una gran variabilidad de costos de agua producida, que pueden ir desde 0,3 a 130  $\$/\text{m}^3$  [7]. Esta variabilidad se puede explicar por la poca información desde el punto de vista comercial que existe de los módulos de membrana, pues en la actualidad no existe ninguna empresa que fabrique los módulos en las diferentes configuraciones (placas, tubos, fibras huecas, etc.), además de no existir estudios a largo plazo del desempeño de las membranas, nivel de ensuciamiento e incrustaciones en éstas, los cuales afectan al costo de producción de agua.



**Figura 9.1:** Efecto de la diferencia de temperatura en relación al costo de producción de agua para un sistema DCMD, considerando un caso con recuperación de calor y otro sin recuperación [35].  
 $T_{b,f,in}$ : temperatura de entrada de alimentación,  
 $T_{b,p,out}$ : temperatura de salida de permeado.

El costo de operación de una planta con tecnología MD, depende principalmente del flujo de agua a tratar y de agua pura requerida; y además, de la temperatura de entrada del fluido a ser tratado. Es por lo anterior, que el costo y desempeño de una planta MD puede ser evaluado también desde el punto de vista de la recuperación de calor, puesto que el requerimiento de calor de un proceso de MD puede llegar a representar el 90% de la energía total requerida [7]. El resto de energía (eléctrica) requerida viene dado por el consumo de componentes como bombas, compresores o bombas de vacío.

Es por esta razón que los sistemas MD que utilizan calor residual de algún proceso existente, o que poseen un sistema de recuperación de calor, resultan ser más atractivos desde el punto de vista económico (Figura 9.1). En caso de que no exista esta capacidad, el costo de operación dependerá directamente del costo del combustible utilizado para producir la energía térmica para operar el sistema.

Otro costo importante que no se encuentra estudiado en detalle corresponde al costo de disposición de concentrado residual del proceso de destilación. Este costo dependerá de las regulaciones locales, terreno disponible, etc. Algunas alternativas para disponer de estos residuos son pozos profundos, piscinas de evaporación y aguas superficiales. La alternativa de depósitos en pozos se ve limitado por el costo de perforación y la capacidad de escalamiento; en cambio la alternativa de piscinas de evaporación se ve limitada por el uso de terreno y por la capacidad volumétrica. Finalmente la alternativa de depositar los concentrados en aguas superficiales se ve limitado por las regulaciones ambientales.

El uso de energías renovables como solar y geotérmica, y además del uso de calor residual de algún proceso industrial, representa una opción para reducir los costos de operación de estos sistemas, sin embargo éstos presentan una inversión inicial mayor en caso de no existir estas instalaciones.

## 9.2 Comparación con tecnologías competidoras

Para realizar un análisis de costos y determinar las ventajas y desventajas de la tecnología de Membrana de Destilación (MD) en comparación con otras tecnologías, se deben conocer los costos de tratamiento de diferentes tipos de agua. Se estima que el costo de tratar aguas no tradicionales como aguas recicladas, aguas superficiales y aguas de proceso puede ir desde 0,26 a 1  $\$/m^3$ . Actualmente no existe tecnología que pueda bajar el costo desde 1 a 0,26  $\$/m^3$ ; y además se debe tener en cuenta que pasar de fuentes tradicionales de agua (aguas superficiales o subterráneas), a aguas de mayor costo de tratamiento como aguas de procesos industriales, aguas salobres, y agua de mar; resultará en costos totales mayores, considerando la fuente y los requerimientos de una población y economía en crecimiento.

En general, en la desalinización de aguas salobres se utilizan tecnologías de Osmosis Inversa (OI) y Electrodialisis (ED); y en el caso de desalinización de agua de mar se utiliza principalmente Osmosis Inversa,

seguida por Destilación Flash Multietapa (MSF) y Destilación Multiefecto (MED). A nivel mundial la tecnología de Osmosis Inversa sigue siendo la más utilizada. Los costos totales de producir un metro cubico de agua desalada por medio de esta tecnología es de aproximadamente 0,98 USD\$/m<sup>3</sup> [37, 38]. Además, la tecnología de Osmosis Inversa sigue siendo la menos intensa en términos de consumo energético.

En la siguiente tabla se muestran los valores típicos de consumo energético de estas tecnologías y el costo de producción de agua desalada asociado.

**Tabla 9.2:** Costos aproximados de operación para tecnologías más utilizadas en desalación [3].

	MED	MSF	OI (agua salobre)	OI (agua de mar)	ED
Presión de vapor (atm)	0,2 - 0,4	2,5 – 3,5	No req.	No req.	No req.
Consumo eléctrico equivalente (kWh/m <sup>3</sup> )	4,5 – 6,0	9,5 – 11,0	No req.	No req.	No req.
Consumo eléctrico (kWh/m <sup>3</sup> )	1,2 -1,8	3,2 – 4,0	0,3 – 2,8	2,5 – 4,0	≥ 0,6 [5]
Consumo energía total (kWh/m <sup>3</sup> )	5,7 – 7,8	12,7 – 15,0	0,3 – 2,8	2,5 – 4,0	≥ 0,6 [5]
Costo total de producción (US\$/m <sup>3</sup> )	0,7 – 3,5	0,9 – 4,0	0,2 – 1,8	0,5 – 3,0	1,2 [39]

La tecnología MD tiene un requerimiento eléctrico de 2 kWh/m<sup>3</sup>, pero puede ser reducida por debajo a 0,01 kWh/m<sup>3</sup>, en caso de que se acople con sistemas de calor residual de procesos.

En cuanto al consumo térmico, los sistemas MD tienen un consumo en el rango de 44 kWh/m<sup>3</sup>, dependiendo de del sistema del diseño y sistema de recuperación definidos, y considerando que el 90% de la energía suministrada se utiliza en el proceso de desalinización y con un GOR (Gain output ratio) de 15. Esta relación corresponde al cociente entre el calor teórico requerido para destilar un cierto flujo de agua, dividido por el calor total utilizado por el sistema. El máximo GOR, sin recuperación de calor latente es de 1; pudiéndose obtener índices mayores con sistemas de recuperación de calor. Con un GOR de 15, la tecnología de MD es competitiva con tecnologías térmicas de destilación.

Se estima que en diseños a gran escala, la tecnología MD será menos costosa en inversión y operación que, por ejemplo la tecnología OI. Esta tecnología no opera en base a grandes presiones del fluido de trabajo,

por lo cual permite el uso de materiales menos costosos y con espesores menores. Los sistemas de OI para desalación de agua de mar operan en presiones de alrededor de 70 bar, en cambio en los sistemas de MD se opera con presiones menores a 1 bar [5].

Se han desarrollado estudios que han estimado los costos de la tecnología MD en base al uso de energía térmica, y comparándolo con el costo de la tecnología de OI. Con esto se ha llegado a la conclusión de que la tecnología MD es competitiva con OI, cuando cuenta con calor a bajo costo y cuando las características del agua a tratar son muy costosas y difíciles de tratar la tecnología OI.

Los costos de producción con de plantas de desalación de pequeñas capacidades, acopladas con energías renovables como solar, eólica y fotovoltaica; se encuentran en el rango de 1,5 a 18 USD\$/m<sup>3</sup>.

**Tabla 9.3:** Costo de operación de tecnologías de desalación con energías renovables (sistemas híbridos) [5].

Procesos	Capacidad (m3/d)	Costo (US\$/m3)
Solar-MED	72 – 85	2 – 10
Solar-MSF	1	2,84
Solar-PV-RO	1	12,05
Geotermal-MD	17	13
Solar-AGMD	66	8,9
Solar-MD	0,1	15
Solar-MD	0,5	18

## 10 Conclusiones

La tecnología de MD ha sido estudiada por más de 40 años, sin embargo solo en la última década se han desarrollado pilotos que han derivado en algunos sistemas a nivel comerciales, pero aun de baja capacidad (hasta 2 m<sup>3</sup>/día) [5].

**Tabla 9.4:** Ejemplos de plantas MD a nivel comercial impulsadas por energía solar [5].

	Scarab	Memsys
Configuración	AGMD	VMD
Área (m <sup>2</sup> )	2,3	-
Membrana	PTFE	-
Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	1 - 2	1
Consumo térmico (kWh/m <sup>3</sup> )	5 -12	175 - 350
Consumo Eléctrico (kWh/m <sup>3</sup> )	0,6 – 1,5	0,75 – 1,75
Sitio de Prueba	Suecia	Singapur

Los desarrollos recientes en esta tecnología se han centrado en un uso eficiente de la energía térmica requerida y también en opciones para reducir el consumo eléctrico. Las propuestas recientes, con el objeto de mejorar la calidad del agua producida y de reducir el consumo de energía, se han orientado al desarrollo de procesos híbridos, conjugando sistemas MD con sistemas convencionales, y utilizando fuentes de energía alternativa como solar, geotérmica, recuperación de calor de procesos, y solar.

Esta tecnología ha sido principalmente probada en desalinización de agua de mar y aguas salobres; sin embargo posee un gran potencial para tratar aguas con otro tipo de contaminantes como metales pesados, radionuclideos, y orgánicos, producidos por procesos industriales y otras aguas de rechazo. A pesar de ser una tecnología versátil para un amplio orden de aplicación, consumo energético la limita para competir con tecnologías como OI, ED, MED y MSF. Sin embargo es posible utilizar esta tecnología en donde las tecnologías actuales no tienen capacidad de operar económica y técnicamente.

La alta pureza de agua que entrega el proceso de MD, presenta una ventaja ante procesos tradicionales comunes particularmente si se requiere de agua pura, por ejemplo en la alimentación calderas. Además, el tratamiento de salmueras provenientes de procesos de osmosis inversa es posible de ser realizado por medio de MD, dando solución a problemas de disposición de residuos (salmuera concentrada).

Las ventajas económicas de esta tecnología se encuentran cuando existe una fuente de calor de bajo costo. La aplicación para tratar aguas utilizando como fuente de energía el calor de rechazo de procesos industriales puede ser una opción viable para la utilización de esta tecnología.

Una limitación de esta tecnología son los bajos flujos que hasta ahora es posible procesar y el efecto de humidificación de las membranas. Estos dos elementos se encuentran directamente relacionados. El hecho de tener una membrana hidrofóbica con una geometría de poros adecuada, limita la humidificación de las membranas, aumentando de esta forma el flujo de agua permeada. Los siguientes pasos en el desarrollo de esta tecnología se deberán concentrar también en este ámbito, es decir en mejorar el desempeño de las membranas, utilizando otros materiales, recubrimientos, o mejorando los proceso de fabricación de estas membranas de manera de lograr tamaños de poro mayor con membranas hidrofóbicas, logrando una mayor permeabilidad al flujo de vapor de agua.

Sin embargo en esta tecnología aún existen aspectos que deben ser estudiados como el diseño y fabricación de módulos y membranas hidrofóbicas, estudio de fenómenos de transporte, estudio de desempeño de membranas y módulos, adecuada caracterización de diferentes configuraciones de membrana en cuanto a su desempeño (flujo permeado, separación, consumo de energía, costos, control de incrustaciones, etc.), análisis económico detallado, sistemas de recuperación de calor, entre otros. Una vez superados estos puntos, y principalmente con la comercialización masiva de las membranas, actualmente de alto costo, la tecnología MD posee un gran potencial, especialmente en su implementación e integración a procesos industriales para obtener eficiencias globales mayores en términos de calidad, costos y consumo energético.

## 11 Referencia

- [1.] Global Clean Water Desalination Alliance – Concept Paper IDA Desalination Yearbook 2015-2016.
- [2.] Atlas del Agua, Chile 2016. Serie de Estudios Básicos DGA, S.E.B. N° 6, ISBN: 978-956-7970-30-8; Diciembre 2015.
- [3.] Nikolay Voutchkov, Desalination Engineering, Planning and Design. ISBN: 978-0-07-177716-2, McGraw Hill, 2013.
- [4.] Qtaishat, Banat, “Desalination by Solar Powered Membrane Distillation Systems”; Elsevier, 2012.
- [5.] Camacho, Dumée, Zhang, Li, Duke, Gomez and Gray, “Advances in Membrane Distillation for Water Desalination and Purification Applications”, ISSN 2073-4441, www.mdpi.com/journal/water; 2013.
- [6.] Winter, J. Koschikowski, D. Düver, P. Hertel, and U. Beuscher, “Evaluation of MD process performance : Effect of backing structures and membrane properties under different operating conditions,” Des, vol. 323, pp. 120–133, Aug. 2013.
- [7.] Khayet and Matsumura, “Membrane Distillation, Principles and Applications”; ISBN: 978-0-444-53126-1, Elsevier, 2011
- [8.] J. Koschikowski, M. Wieghaus, and M. Rommel, “Solar thermal driven desalination plants based on membrane distillation,” Desalination, vol. 156, no. 1–3, pp. 295–304, Aug. 2003.
- [9.] D. Winter, J. Koschikowski, and S. Ripperger, “Desalination using membrane distillation: Flux enhancement by feed water deaeration on spiral-wound modules,” J. Memb. Sci., vol. 423–424, pp. 215–224, Dec. 2012.
- [10.] D. Winter, J. Koschikowski, F. Gross, D. Maucher, D. Düver, M. Jositz, T. Mann, and A. Hagedorn, “Comparative analysis of full-scale membrane distillation contactors - methods and modules,” J. Memb. Sci., vol. 524, pp. 758–771, Feb. 2017.
- [11.] E.Drioli, B.L. Jiao, V.Calabro. “The preliminary study on the concentration of orange juice by membrane distillation”, Proc. Int. Soc. Citriculture 3 (1992)
- [12.] C.A. Jensen, F. Macedonio, C. Conidi, A. Cassano, S. Aljlil, O.A. Alharbi, E. Drioli. “Direct contact membrane distillation for the concentration of clarified orange juice”, Ind. Eng. Chem. Res. 33 (1994).
- [13.] V. Calabro, E. Drioli, F. Matera, Membrane distillation in the textile wastewater treatment, Desalination 83 (1991)
- [14.] Grażyna Zakrzewska-Trznadel. “Membrane processes for environmental protection: applications in nuclear technology”, 2006
- [15.] Junghyun Kima, Heejung Kwonb, Seockheon Lee, Sangho Lee, Seungkwan Hong. “Membrane distillation (MD) integrated with crystallization (MDC) for Shale Gas produced water (SGPW) treatment”, 2017

- [16.] D. Qu, J. Wang, D. Hou, Z. Luan, B. Fan, C. Zhao. "Experimental study of arsenic removal by direct contact membrane distillation", 2009
- [17.] H. Udriot, S. Ampuero, I.W. Marison, U. von Stokar. "Extractive fermentation of ethanol using membrane distillation", 1989.
- [18.] H. Udriot, A. Araque, U. von Stockar, "Azeotropic mixtures may be broken by membrane distillation", 1994.
- [19.] S. Kimura, S. Nakao, "Transport phenomena in membrane distillation", J. Membr. Sci. 33, 1987.
- [20.] G. Caputo, C. Felici, P. Tarquini, A. Giaconia, S. Sau, "Membrane distillation of HI/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>O mixtures for the sulphur-iodine thermochemical process", Int. J. Hydrogen Energy, 2007.
- [21.] B. Li, K.K. Sirkar, "Novel membrane and device for vacuum membrane distillation-based desalination process", J. Membr. Sci. 257, 2005.
- [22.] Y. Xu, B. Zhu, Y. Xu, "Pilot test of vacuum membrane distillation for seawater desalination on a ship", Desalination 189, 2006.
- [23.] A. Criscuoli, J. Zhong, A. Figoli, M.C. Carnevale, R. Huang, E. Drioli, "Treatment of dye solutions by vacuum membrane distillation", Water Res. 42, 2008.
- [24.] T. Mohammadi, M. Akbarabadi, "Separation of ethylene glycol solution by vacuum membrane distillation (VMD)", Desalination 181, 2005.
- [25.] M. Khayet, P. Godino, J.I. Mengual, "Theoretical and experimental studies on desalination using sweeping gas membrane method", Desalination 157, 2003.
- [26.] Zongli Xie, Tuan Duong, Manh Hoang, Cuong Nguyen, Brian Bolto. "Ammonia removal by sweep gas membrane distillation", Water Research 43, 2009.
- [27.] F. Banat, N. Jwaied, M. Rommel, J. Koschikowski, and M. Wieghaus, "Performance evaluation of the 'large SMADES' autonomous desalination solar-driven membrane distillation plant in Aqaba, Jordan," Desalination, vol. 217, no. 1–3, pp. 17–28, Nov. 2007.
- [28.] R. Schwantes, A. Cipollina, F. Gross, J. Koschikowski, D. Pfeifle, M. Rolletschek, and V. Subiela, "Membrane distillation: Solar and waste heat driven demonstration plants for desalination," Desalination, vol. 323, pp. 93–106, Aug. 2013.
- [29.] Fortkamp, Royen, Klinspor, Ekengren, Martin, Woldemariam. "Membrane Distillation pilot tests for different wastewaters", Number B 2236 Foundation for IVL Swedish environmental Research Institute, 2015.
- [30.] Bouguecha, Hamrouni, Dhahbi. "Small scale desalination pilots powered by renewable energy sources: case studies", Desalination, 2005.
- [31.] M. Gryta, K. Karakulski, A.W. Morawski, "Purification of oily wastewater by hybrid UF/MD", Water Res. 35, 2001
- [32.] E. Drioli, F. Lagana, A. Criscuoli, G. Barbieri, "Integrated membrane operations in desalination process", Desalination 122, 1999

- [33.] M. Gryta, The fermentation process integrated with membrane distillation, *Sep. Purif. Technol.* 24, 2001.
- [34.] J. Wang, B. Fan, Z. Luan, D. Qu, X. Peng, D. Hou, Integration of direct contact membrane distillation and recirculating cooling water system for pure water production, *J. Cleaner Production* 16, 2008.
- [35.] Sulaiman Al-Obaidania, Efrem Curcio, Francesca Macedonio, Gianluca Di Profio, Hilal Al-Hinai, Enrico Drioli. "Potential of membrane distillation in seawater desalination: Thermal efficiency, sensitivity study and cost estimation"; *Journal of membrane Science*, 2008.
- [36.] G.C. Sarti, C. Gostoli and S. Bandini "Extraction of organic components from aqueous streams y vacuum membrane distillation" *Journal of membrane Science*, 1993.
- [37.] F. Silva Pinto, R. Cunha Marques, "Desalination projects economic feasibility: A standardization of cost determinants", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [38.] IRENA, "Renewable Desalination : Technology Options for Islands," no. October, 2015. Study of Fraunhofer ISE for IRENA
- [39.] H. Strathmann, "Assessment of Electrodialysis Water Desalination Process Costs", Institute of Chemical Engineering, University of Stuttgart, Germany, 2004.

**Fraunhofer Chile Research**  
**Center for Solar Energy Technologies (CSET)**  
Centro de Innovación UC Anacleto Angelini, Piso 8  
Av. Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile

**[www.fraunhofer.cl](http://www.fraunhofer.cl)**

Proyecto apoyado por:

