

Trabajo fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio comparativo de la destilación con
membranas frente a la evaporación en el tratamiento
de aguas salobres

Autor: María González Barrientos

Tutoras: Fátima Arroyo Torralvo

Mónica Rodríguez Galán

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería en Tecnologías Industriales

Estudio comparativo de la destilación con membranas frente a la evaporación en el tratamiento de aguas salobres

Autor:

María González Barrientos

Tutor:

Profesor titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Carrera: Estudio comparativo de la destilación con membranas frente a la evaporación en el tratamiento de aguas salobres

Autor: María González Barrientos

Tutor:

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

A mis amigos

Agradecimientos

En primer lugar, agradecerle a mis padres, Cristóbal y Mónica, por todo el sacrificio, ayuda y apoyo incondicional durante la carrera y hacer que sea lo más llevadera posible. También a mi hermana, a mis abuelos y a mi familia.

En segundo lugar, a mis amigos, de industriales, de química y los que no son de la carrera. Pero principalmente a Bego, Marta y Alfonso, por hacerme sentir una química más, y por hacer entretenidos y divertidos todos los días que hemos pasado juntos, incluso estudiando.

Por último, a los profesores que he conocido y he podido tener el placer de que me impartan clase. Especialmente a mis tutoras, por su tiempo, ayuda y comprensión, para la realización de este trabajo.

María González Barrientos

Sevilla, 2023

La finalidad de este proyecto es realizar una comparativa entre dos tipos de procedimientos para desalinizar.

Actualmente existe una gran preocupación en nuestro planeta, debido a la escasez de agua potable que se ve agravado por la evolución del cambio climático. Por lo que el objetivo es conseguir darle solución a este problema lo antes posible.

Las operaciones de separación que se van a estudiar y comparar son: la destilación con membranas (DM) y la evaporación. Usando como fluido aguas pertenecientes al Mar Muerto.

En primer lugar, se desarrolla el funcionamiento y las características a destacar de cada operación, así como sus configuraciones, módulos, ventajas, usos o aplicaciones. Seguidamente, se explican los diferentes balances y ecuaciones usadas en cada método para poder realizar la comparación entre los valores de los parámetros. Estos indicadores que se van a comparar son la cantidad de energía necesaria que conlleva el proceso para su realización y la cantidad de producto obtenido en él. Todo esto para un mismo caudal de alimentación y grado de separación.

Abstract

The purpose of this project is to make a comparison between two types of desalination processes.

There is currently great concern on our planet due to the shortage of drinking water, which is aggravated by the evolution of climate change. The aim is to find a solution to this problem as soon as possible.

The separation operations to be studied and compared are membrane distillation (MD) and evaporation. Using water from the Dead Sea as a fluid.

First, the operation and characteristics of each operation, as well as their configurations, models, advantages, uses or applications, are developed. Then, the different balances and equations used in each method are explained in order to compare the values of the parameters. These indicators to be compared are the amount of energy required to carry out the process and the amount of product obtained. All this for the same feed flow rate and degree of separation.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Destilación con Membranas.</i>	2
1.1.1 Membranas empleadas en la operación de destilación con membranas	3
1.1.2 Configuraciones	5
1.1.3 Ventajas e inconvenientes de la destilación con membranas	8
1.1.4 Usos y aplicaciones	9
1.2 <i>Introducción a la Evaporación</i>	9
1.2.1 Características y propiedades	10
1.2.2 Tipos de evaporadores	10
➤ De circulación natural	11
➤ De circulación forzada	12
➤ Evaporador de pared fina agitada (Agitated thin-film evaporators)	13
➤ Evaporador de película ascendente / descendente (Rising / falling evaporator)	13
1.2.3 Disposición de los evaporadores	15
2 Efluente seleccionado para el estudio	17
3 Ecuaciones de Balance y Cálculos para la comparativa alternativas efluente (DM vs Evaporación)	19
3.1 <i>Balances en la Destilación con membranas</i>	19
➤ Datos de la destilación con membrana	23
3.2 <i>Balances en la Evaporación</i>	25
4 Resultados	29
4.1 <i>Resultados de la Destilación con Membranas</i>	29
4.2 <i>Resultados de la Evaporación</i>	31
5 Discusión de Resultados	33
6 Conclusiones	35
Referencias	37
Anexo I: Definición de Parámetros	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Energía superficial y conductividad térmica de los materiales más utilizados en DM [7-9]	4
Tabla 1-2. Característica de los materiales	5
Tabla 1-3. Evaporador en función del proceso [26]	14
Tabla 1-4. Evaporador en función del proceso [26]	14
Tabla 2-1. Composición de sales en el Mar Muerto [34]	18
Tabla 3-1. Tipos de polímeros y parámetros [11]	22
Tabla 3-2. Parámetros de la membrana	23
Tabla 3-3. Parámetros del Mar Muerto	23
Tabla 3-4. Parámetros del agua pura	24
Tabla 3-5. Otros parámetros	24
Tabla 3-6. Parámetros del equipo de calentamiento	25
Tabla 3-7. Parámetros del equipo de enfriamiento	25
Tabla 3-8. Parámetros del evaporador	27
Tabla 4-1. Resumen de los valores obtenidos	30
Tabla 4-2. Cantidad de sales extraídas	30
Tabla 4-3. Resultados de los equipos de calentamiento y enfriamiento	31
Tabla 4-4. Resultados a comparar de la destilación con membranas	31
Tabla 4-5. Resultados del evaporador	31
Tabla 4-6. Resultados a comparar de la evaporación	31
Tabla 5-1. Resultados a comparar	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Reserva hídrica española [2].	1
Figura 1-2. Esquema de una célula de destilación con membrana [4].	2
Figura 1-3. Ilustración de un poro irregular, (1) estado líquido, (2) estado vapor [4].	3
Figura 1-4. Tipos de módulos de membrana, (a) Con tubos de fibra hueca, (b) Placa y marco [6].	5
Figura 1-5. Configuración DCMD y AGMD [12].	6
Figura 1-6. Configuración SGMD y VMD [12].	7
Figura 1-7. Configuración LGMD/WGMD y TSGMD [11].	8
Figura 1-8. Configuración VA-AGMD [11].	8
Figura 1-9. Tipo de evaporador, (a) de tubos horizontales, (b) de tubos horizontales pulverizados [17, 23].	11
Figura 1-10. Tipo de evaporador, (a) de tubos verticales cortos, (b) de tubos verticales largos [17].	12
Figura 1-11. Tipo de evaporador, (a) de película fina agitada, (b) de película ascendente /descendente [17].	13
Figura 1-12. Tipo de evaporador de efecto múltiple, (a) directa, (b) a contracorriente [27].	16
Figura 1-13. Tipo de evaporador de efecto múltiple, (a) mixta, (b) en paralelo [27].	16
Figura 2-1. Mar Muerto [29]	17
Figura 3-1. Corrientes en un evaporador simple	26

Notación

DM	Destilación con membranas
CDMD	Destilación con membranas con contacto directo
AGMD	Destilación con membrana con gap o banda de aire
SGMD	Destilación con membrana por arrastre de gas
VMD	Destilación con membrana a vacío
LGMD	Destilación con membrana de separación de líquidos o de agua
VA-AGMD	Destilación con membrana de separación de aire asistida por vacío
TSGMD	Destilación con membrana de gas de barrido termostático
LEP	Presión de entrada del líquido
PTFE	Politetrafluoroetileno
PP	Polipropileno
PVDF	Difluoruro de poli vinilideno

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el obtener agua potable disponible se ha convertido en un desafío a nivel mundial, esto supone un grave problema ocasionado como consecuencia de la contaminación de los recursos hídricos, el cambio climático y el crecimiento constante de la población que debe ser solucionado con urgencia. El aumento del consumo de agua en la población, en las industrias, en la agricultura o en otros sectores, ha generado presiones sin precedentes sobre la disponibilidad de agua potable. Hoy por hoy, la reserva hídrica española se encuentra en un 42% de su capacidad [1]. En la Figura 1-1 se observa la evolución del agua que contienen los embalses en la semana 31 de los últimos años respecto a su capacidad total [2]. Actualmente se siguen implantando normas como BOE-A-2023-11187 para poder frenar este hecho. En la norma mencionada se plantean y se recogen nuevas medidas para reducir el impacto que pueda provocar la sequía, debido a que algunas cuencas españolas se encuentran en un nivel crítico.

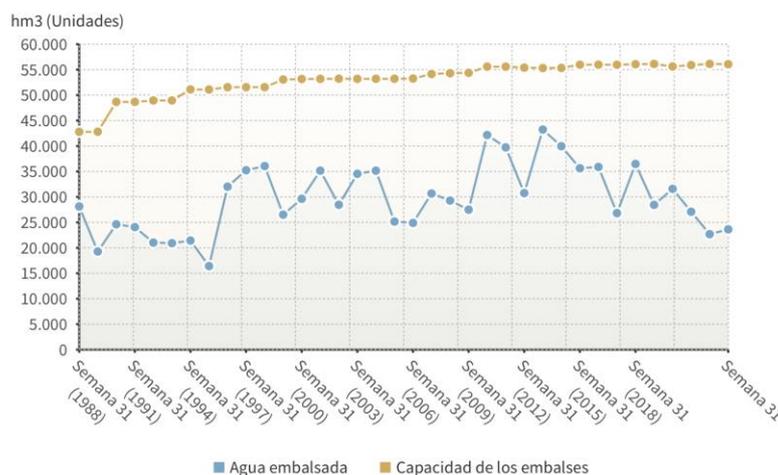


Figura 1-1. Reserva hídrica española [2].

Teniendo en cuenta que los niveles de reservas de agua se encuentran bajo mínimos, urge la necesidad de encontrar soluciones sostenibles a este problema, como por ejemplo las técnicas de purificación de agua.

En lo que respecta a las técnicas de purificación del agua, se pueden utilizar diferentes técnicas de separación, hoy por hoy se utilizan en las industrias: destilación convencional, ósmosis inversa, evaporación, filtración...

Otra operación de separación es la destilación con membranas, ésta es una operación de separación, que consiste

en un proceso de separación cuya fuerza impulsora es la diferencia de presiones, se presenta en estos últimos años como una opción importante. En esta tecnología se combinan los principios de la destilación con las ventajas que ofrecen las tecnologías de membrana y se solucionan algunas de las limitaciones presentes en los métodos de destilación convencional.

Al ser considerada una tecnología emergente, está siendo estudiada tanto en universidades como en centros públicos o privados mediante plantas pilotos. Algunas de estas empresas que desarrollan esta tecnología son: AquaStill, Memsys, CSRE o SolarSpring.

En este trabajo se realizará una comparativa entre la desalinización mediante una técnica tradicional de evaporación y la técnica de destilación con membranas.

1.1 Destilación con Membranas.

La tecnología de destilación con membranas (en adelante, DM) viene estudiándose desde los años 60, pero no avanzó tanto como podía esperarse ya que las membranas disponibles no eran apropiadas, además de muy costosas. Debido a las mejoras en las membranas, hoy en día cada vez son más el número de artículos e investigaciones que analizan esta tecnología. Este desarrollo está consiguiendo que la destilación con membranas sea competitiva con otros procesos de desalinización. Se prevé su utilización en las industrias de forma intensiva en un futuro cercano.

En la Figura 1-2 se puede ver un esquema de la operación de DM en un módulo de membrana plana, generalmente empleados en estudios de laboratorio. En la separación se emplea una membrana hidrofóbica, es decir, que no deja pasar agua a través de ella, no se “moja”. Por tanto, sólo pueden pasar a través de ella partículas en estado gaseoso. Esta membrana divide en dos partes el módulo, una parte donde es introducida la alimentación (1), y la otra, donde se recoge el permeado (2).

El transporte de materia se produce desde la zona de alimentación hasta la zona de permeado, gracias a la diferencia de presiones entre ambos lados. Esto ocurre mientras un lado de la membrana se encuentre caliente y el otro frío, ya que un mismo líquido a diferentes temperaturas posee diferentes presiones de vapor. Además, se elevará la temperatura de alimentación para favorecer la evaporación de una parte del líquido pasando a estado gaseoso, para así poder atravesar la membrana. Cuando el vapor pasa a la zona de permeado, éste será condensado en el interior o en el exterior del módulo con la ayuda de un condensador, en función de su configuración.

En esta operación, la membrana sólo actúa como barrera entre las dos fases. La selectividad en este proceso es definida por el equilibrio líquido-vapor que existe, el componente de mayor presión parcial es el que permea con mayor velocidad [3].

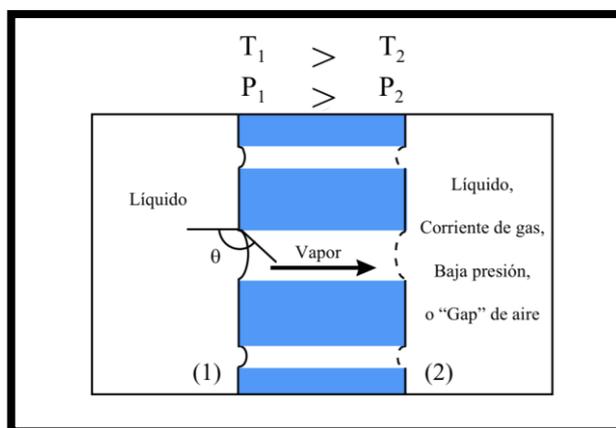


Figura 1-2. Esquema de una célula de destilación con membrana [4].

Una de las diferencias de esta operación de separación con otras como la evaporación o la destilación convencional, es que se necesita menos energía, debido a que no es necesario llegar a la temperatura de ebullición de los compuestos a separar. Al necesitar menos energía, en la destilación con membrana se puede usar energías renovables como la energía solar, geotérmica o eólica, con lo que el coste disminuye y la eficiencia energética sube [5].

Por otro lado, en el proceso de la ósmosis inversa en relación con la DM, se necesita una mayor presión hidrostática.

1.1.1 Membranas empleadas en la operación de destilación con membranas

Una membrana supone una barrera física entre dos fluidos. Su principal función es no dejar pasar líquido al otro lado de la membrana. Respecto a la transferencia de calor, la membrana tiene como objetivo dejar pasar el mínimo calor posible, para así aumentar la fuerza impulsora del proceso que será la diferencia de presiones de vapor [6].

Las características de las membranas que se han de tener en cuenta para la selección de esta son:

- Su espesor, cuanto mayor sea este parámetro mayor será la resistencia de la membrana al flujo de calor. Por tanto, la diferencia de temperaturas que habrá entre las dos zonas será mayor. Por otro lado, cuanto más grosor tenga, más difícil será el paso de vapor y disminuirá la cantidad de permeado. Por lo que, se buscará un equilibrio entre estas dos consecuencias.
- El tamaño del poro, esta operación se realiza con tamaños de poros más grandes que otras operaciones como, por ejemplo, la ósmosis inversa o la ultrafiltración. Gracias a ello no ocurren con tanta facilidad las incrustaciones en los poros de la membrana. Además, si se aumenta el tamaño del poro disminuirá la presión de entrada del líquido (LEP), un parámetro importante en la operación de DM.

El parámetro LEP indica la presión a la cual el líquido puede traspasar la membrana, si ocurre esto, la característica de hidrofobicidad no se mantendría, aspecto que no interesa. Por tanto, la presión hidrostática tendrá que ser mayor que el valor de LEP para que no ocurra. Este factor depende de varios parámetros como puede verse en la ecuación 1 [4]:

$$LEP = \frac{-2 \cdot B \cdot \gamma_1}{R_{\text{máx}}} \cdot \cos(\theta) < P_1 - P_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde γ_1 es la tensión superficial del líquido, B es un factor que depende de la geometría de los poros (cuando posee forma cilíndrica es igual a la unidad, y si no es menor a uno), θ es el ángulo de contacto entre el líquido y la membrana que debe ser mayor de 90° , y $R_{\text{máx}}$ es el radio máximo de los poros. Las presiones P_1 y P_2 indican la presión en el líquido y en el interior de los poros. Estos factores se pueden apreciar en la Figura 1-3.

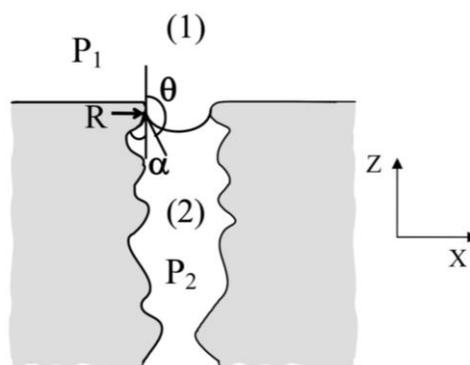


Figura 1-3. Ilustración de un poro irregular, (1) estado líquido, (2) estado vapor [4].

- La energía superficial ésta interfiere en la adhesión o repulsión con otro material: cuanto menor sea la energía superficial, mayor repulsión habrá hacia el líquido, lo que provocará un aumento de la hidrofobicidad. En este caso, se podrían utilizar mayores tamaños de poros y mayor presión, aspectos que benefician el proceso.
 - La conductividad térmica se define como la capacidad de hacer pasar calor a través de la membrana. Esto sería perjudicial para el proceso si la conductividad térmica de la membrana fuera elevada, ya que ocasionaría una menor diferencia de temperaturas entre las dos paredes de la membrana, y por tanto disminuiría la fuerza impulsora, haciendo pasar menos cantidad de vapor.
- La energía superficial y la conductividad térmica en los materiales normalmente usados para fabricar las membranas que se emplean en la operación DM se recogen en la Tabla 1-1.

Tabla 1-1. Energía superficial y conductividad térmica de los materiales más utilizados en DM [7-9]

Material de la membrana	PVDF	PTFE	PP
Energía Superficial ($\times 10^{-3}$ N/m)	30,3	9-20	30,0
Conductividad térmica (W/m·K)	~0,19	~0,25	~0,17

- La porosidad. Una alta porosidad provoca que la transferencia de calor a través de la membrana disminuya, pero también hace disminuir la resistencia mecánica, ocasionando que la membrana sea más frágil y pudiéndose agrietar o romper con más facilidad [6].

➤ Materiales

Una manera de clasificar las membranas es en función del material que se componen. Los materiales más usados son: PTFE (politetrafluoroetileno), PP (polipropileno) y PVDF (difluoruro de polivinilideno). [6] Estos materiales buscan tener una gran hidrofobicidad, una buena resistencia mecánica y química, y una baja conductividad térmica.

- La hidrofobicidad no permite el paso de líquido a través de la membrana.
- La resistencia química permite usar fluidos que puedan tener algún compuesto ácido.
- La resistencia mecánica permite a la membrana resistir fuerzas sin llegar a romperse.
- La baja conductividad térmica provoca que haya una mayor diferencia de temperatura entre ambos lados, aumentando así la fuerza impulsora.

Las membranas de PTFE poseen una gran hidrofobicidad respecto a los demás materiales, ya que éste tiene un mayor ángulo de contacto con el líquido. También dispone de una buena resistencia a la oxidación. En cambio, como aspecto negativo posee una conductividad alta.

Las membranas PVDF, poseen igualmente una buena hidrofobicidad y resistencia mecánica.

Por último, las membranas PP disponen de estabilidad química y térmica, al igual que los anteriores materiales [6].

Estas características se encuentran recogidas en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Característica de los materiales

Tipo de material	Hidrofobicidad	Resistencia química	Resistencia mecánica	Conductividad térmica
PTFE	Excelente	Buena	Buena	Alta
PVDF	Muy buena	Buena	Buena	Baja
PP	Buena	Buena	Normal	Media

Otro compuesto que se está investigando y se cree que es una buena opción, es el ECTFE (poli(etilclorotrifluoroetileno)), debido a su valor tan alto de hidrofobicidad. Además, posee una alta resistencia a disolventes y se mantiene estable en un amplio rango de temperaturas. El inconveniente es su producción, ya que se realiza a unas temperaturas muy elevadas [10].

➤ Módulos

Otra forma de clasificar las membranas es por su módulo, las más comunes suelen ser de placa y marco o con tubos de fibra hueca.

El módulo de tubos con fibra hueca, Figura 1-4 (a), suele encontrarse integrado en el equipo, lo que les hace más difíciles de reemplazar. El área activa en este caso es muy grande, a pesar de que se obtiene una menor cantidad de producto. La alimentación en la membrana con tubos de fibra hueca puede ser introducida por los tubos o la carcasa, dependiendo por donde se introduzca la alimentación, en el otro lado estará la zona de permeado, y se puede encontrar un líquido refrigerante, un vacío o un gas de arrastre.

En el módulo de placa y marco, Figura 1-4 (b), se usan membranas planas, este es el más usado porque en caso de ser sustituidos (bien por deterioro, por rotura...) son más fáciles de reemplazar. Su desventaja es su menor área activa, aunque se puede aumentar ésta situando varios de estos módulos en paralelo. Esto suele usarse para todas las configuraciones de DM [6,10].

También hay más módulos menos empleados en DM, como los módulos en espiral, el cual se caracteriza por su elevada área activa. Suele ser usado en específicas configuraciones.

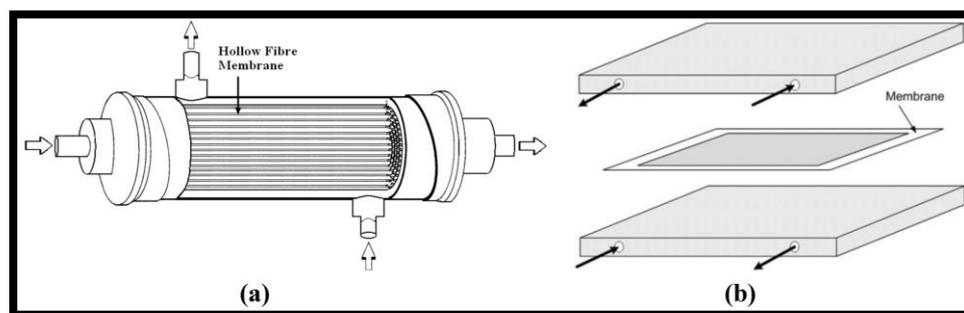


Figura 1-4. Tipos de módulos de membrana, (a) Con tubos de fibra hueca, (b) Placa y marco [6].

1.1.2 Configuraciones

Existen varios tipos de destilación con membranas, dependiendo de las características del fluido se elegirá uno u otro. Las configuraciones más conocidas son:

1) Destilación con membranas en contacto directo (DCMD)

En este caso, en el lado del permeado se hace pasar un líquido frío, en general es agua fría. Este líquido se encuentra en contacto directo con la membrana, cuya función es provocar la condensación del vapor que pasa a través de los poros de la membrana desde el lado caliente. Esta configuración es la más conocida y simple, puede usarse con cualquier tipo de membrana (capilares, tubos, planas...). Esto suele utilizarse para

disoluciones de solutos no volátiles, (por ejemplo: disoluciones acuosas de sales). El inconveniente es una baja eficiencia térmica debida a la proximidad entre la zona caliente (zona de alimentación) y la zona fría (zona de permeado). A pesar de esto, esta configuración posee mejor rendimiento que VMD, se necesita menor volumen de módulo que AGMD y es más económica que SGMD [11].

2) Destilación con membranas con gap o banda de aire (AGMD)

En este caso, la condensación en la zona de permeado se realiza gracias a una cámara de aire y una superficie fría. El vapor atraviesa tanto la membrana como a la cámara llegando a una pared que se encuentra a una temperatura muy baja, debido a que al otro lado circula un fluido frío, lo que provoca la condensación del vapor en la superficie. Todo esto hace que las pérdidas por calor sean mucho menores que en las otras configuraciones. El inconveniente es que sólo se pueden utilizar las membranas planas o con los tubos de fibra hueca, debido a la cámara de aire, haciendo también que el módulo sea de mayor tamaño. Según los estudios, esta configuración aspira a ser la ideal respecto a la gestión de la energía [11].

En la Figura 1-5 se representan las configuraciones DCMD y AGMD.

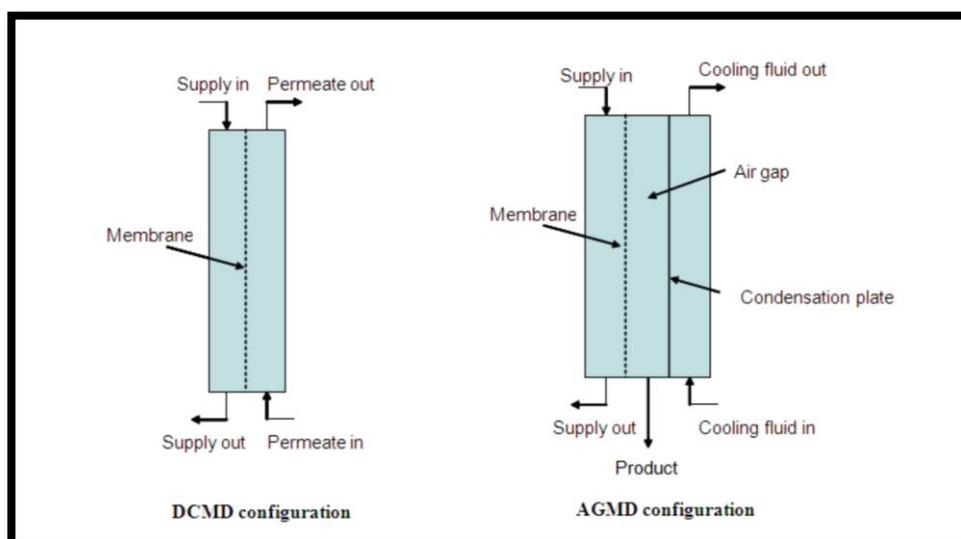


Figura 1-5. Configuración DCMD y AGMD [12].

3) Destilación con membranas por arrastre de gas (SGMD)

El gas utilizado en esta configuración debe ser inerte y circular en gran cantidad. Cuando el vapor llega a la zona de permeado, es arrastrado por el gas y llevado hasta un condensador situado en el exterior del módulo de la destilación. La cantidad de permeado obtenido es muy alto en comparación con AGMD, y, además, posee una mayor eficiencia térmica que DCMD, debido a que la temperatura del gas no influye en el proceso. La gran limitación de este modelo es el elevado coste que conlleva [11].

4) Destilación con membranas a vacío (VMD)

Gracias a una bomba situada en el exterior del módulo, se crea vacío en el lado de permeado, para poder extraer los vapores que han atravesado la membrana y llevarlos hasta un condensador que se encuentra fuera. Es el menos usado y se suele utilizar para componentes volátiles en disoluciones acuosas diluidas. Como ventaja los flujos son mayores, pero el inconveniente es la gran diferencia de presiones que puede provocar que se “mojen” los poros de la membrana [11].

Igualmente, se encuentran representadas las configuraciones SGMD y VMD en la Figura 1-6.

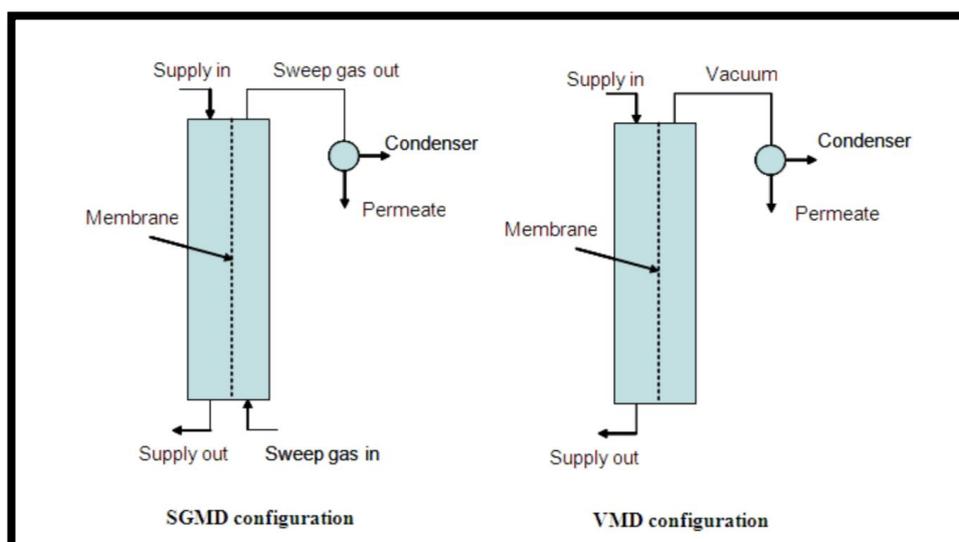


Figura 1-6. Configuración SGMD y VMD [12].

Además de estas configuraciones, existen otras tres más recientes y que ya se está trabajando con ellas:

5) Destilación con membranas de separación de líquidos o de agua (LGMD/WGMD)

Surge de la combinación de DCMD y AGMD. Se asemeja al AGMD ya que también posee una superficie fría, pero ésta en vez de estar en la cámara un gas, lo que hay es un líquido frío estancado, como se aprecia en la Figura 1-7. Esto hace que el coeficiente de transferencia de calor en el permeado sea mayor en esta configuración [11].

6) Destilación con membranas de gas de barrido termostático (TSGMD)

Combina tanto AGMD como SGMD, es decir, contiene igualmente la pared fría, pero en vez de haber una cámara de aire estancada, en ésta, se encuentra un gas de barrido, esto se puede observar en la Figura 1-7. Parte del vapor es condensado por la superficie, aunque la mayor parte lo hace en el condensador. Este modelo hace pasar más cantidad de fluido que AGMD [11].

7) Destilación con membranas de separación de aire asistida por vacío (VA-AGMD)

Esta configuración se muestra en la Figura 1-8. En este caso, mezcla AGMD con VMD, al igual que en las otras dos configuraciones anteriores contiene una superficie fría y en lugar haber una cámara de aire, se hace vacío para extraer el vapor con las partículas que se haya condensado. Eliminando los gases no condensables llevándolos a una presión por debajo de la de saturación. Como ventaja, hace pasar gran cantidad de caudal a través de la membrana y tiene una buena eficiencia. Sin embargo, es más costoso que DCMD y AGMD [11].

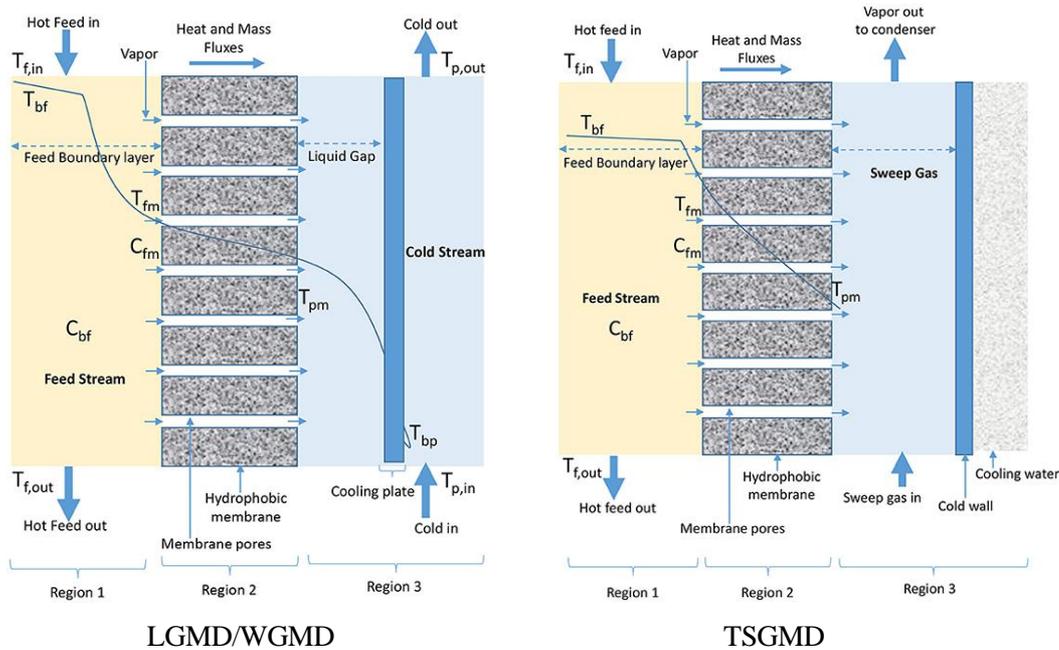


Figura 1-7. Configuración LGMD/WGMD y TSGMD [11].

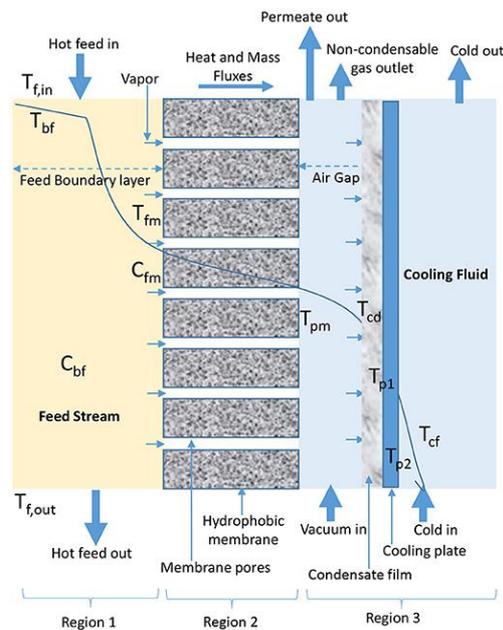


Figura 1-8. Configuración VA-AGMD [11].

1.1.3 Ventajas e inconvenientes de la destilación con membranas

Los sistemas de destilación con membranas poseen una serie de ventajas e inconvenientes con respecto a la operación, que se explicarán a continuación:

- Ventajas:

La ventaja más destacable es el valor tanto de la temperatura como de la presión a la que se opera, ya que, comparado con los demás procesos de separación, estas magnitudes tienen valores menores, usando una temperatura inferior a la de ebullición y una presión menor a la atmosférica [13]. Por lo tanto, este proceso tiene un menor coste energético que, se podría satisfacer haciendo usos de energías renovables o calor residual de otras partes del proceso industrial [5], aumentando así su eficiencia energética.

De la misma forma, al no necesitar una temperatura o presión tan elevada, se pueden separar compuestos térmicamente sensibles [3,4].

Por otra parte, si se compara la DM con la destilación convencional, los equipos son más compactos debido a que las zonas donde se encuentran los vapores son más pequeñas. Por otro lado, la membrana tiene los poros más grandes que los procesos de separación como ósmosis inversa, ultrafiltración o microfiltración, esto hace que se obstruyan menos y no haya que cambiarlos con la misma frecuencia [4].

- Inconvenientes:

El mayor inconveniente es la presión de alimentación, que se encuentra limitada por el valor de LEP (presión mínima a la cual se impide el paso del líquido de un lado a otro de la membrana) [4].

Otro de los inconvenientes, es la cantidad de fluido que se puede procesar, puesto que es menor que otras operaciones de separación. Por este motivo, si para el proceso se necesita separar de gran cantidad de fluido, la destilación con membranas no sería recomendable [4].

El coste económico de esta tecnología aumenta debido a la membrana, a consecuencia de su deterioro por su uso.

1.1.4 Usos y aplicaciones

Actualmente, no es un proceso que esté implantado a escala industrial. Un ejemplo sobre su investigación ocurrió en una planta piloto estadounidense, que utilizando la configuración DCMD, se obtuvieron resultados muy satisfactorios sobre la desalinización de Long Island Sound [14].

Otra utilidad que se le puede dar a esta operación es conseguir extraer de las aguas residuales de las industrias los componentes contaminantes, y poder verter esas aguas sin contaminar al medio ambiente o reutilizarlas para otros trabajos. Por ejemplo, esto sería de gran utilidad en la industria textil, que es el sector que produce más cantidad de aguas contaminadas.

Con esta operación se pretende que gracias a su alta eficiencia sea un método ideal para estos efluentes, siempre cuando se consiga mayor cantidad de permeado [15].

Otra finalidad que tiene la DM es trabajar con productos térmicamente sensibles, como la producción de zumos, leche... ya que se opera con valores moderados de temperatura [16].

1.2 Introducción a la Evaporación

La evaporación es un proceso unitario que, mediante la aplicación de calor, provoca el cambio de estado líquido a estado gaseoso de las partículas más volátiles que se encuentran en un fluido. Se emplea con la finalidad de eliminar o separar las sustancias volátiles y obtener una solución más concentrada o dos soluciones diferentes. Los evaporadores se pueden encontrar en muchos tipos de procesos, aplicados tanto escala de laboratorio como a escala industrial. Los sectores donde más se emplean la evaporación son las industrias alimentaria, química y farmacéutica. Existen varios tipos de evaporadores, diferenciados en función a la distribución del fluido caloportador y de la alimentación. El esquema de un evaporador simple se puede apreciar en la Figura 1-9. Hoy en día, se siguen desarrollando nuevos modelos de evaporadores para un proceso específico. Al tener este equipo un alto coste energético se busca un gasto mínimo de energía para obtener la concentración necesaria [17].

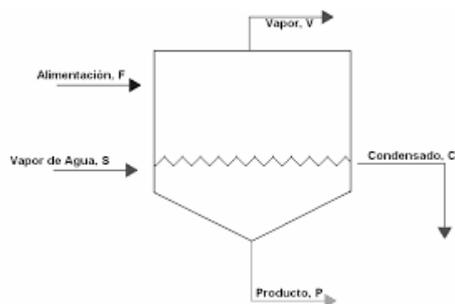


Figura 1-9. Esquema de un evaporador [18].

A diferencia del secado, en el que el producto obtenido es un sólido, en la evaporación se obtiene un producto líquido. Por otro lado, la destilación convencional no necesita tanta energía en comparación con la evaporación.

Para reducir el gasto de energía se desarrollan los evaporadores de múltiple efecto, que son evaporadores simples colocados en paralelo, en serie, donde puede ser con alimentación directa o con alimentación a contracorriente o mixta [19].

1.2.1 Características y propiedades

Para realizar esta operación se han de tener en cuenta algunos factores de operación o propiedades del fluido. El valor de estas características deberá ajustarse para optimizar el proceso. Los principales parámetros a tener en cuenta son:

- Sensibilidad de la alimentación a la temperatura

En algunos procesos, principalmente en el sector de alimentación, hay productos como los zumos, la leche... que son sensibles a altas temperaturas o a una determinada temperatura durante un tiempo muy prolongado y se vuelven inservibles, no se pueden utilizar. Este hecho determina el valor de la temperatura de operación, esto se puede evitar disminuyendo el valor de la temperatura, el tiempo de evaporación o el nivel de la presión [17].

- Formación de espuma

Es habitual que en un proceso de evaporación ocurra la formación de espuma, por ejemplo, es habitual en el caso de la leche o de las aguas residuales. En el proceso de evaporación, esa espuma formada se desplaza con el vapor, produciéndose pérdidas de la sustancia a purificar y bajando la eficiencia del proceso. Este hecho se puede solucionar de diferentes formas, una de ellas es variando el diseño, aumentando el diámetro del evaporador, para que la velocidad en el equipo disminuya y sea lo menos turbulento posible, ya que eso provoca la aparición de espuma. Por otro lado, la formación de espuma se puede controlar bajando la velocidad del vapor, y, por último, añadiendo un antiespumante. La última alternativa sólo se debe usar ocasionalmente, ya que una sobredosis de esta puede provocar el efecto contrario [20].

- Ensuciamiento y formación de incrustaciones

Esto sucede cuando se precipitan los sólidos de la alimentación en el evaporador, con el tiempo la solubilidad disminuye y se acumula una película en el área de transferencia de calor, por tanto, esto reduce el coeficiente de transferencia de calor evaporándose menos cantidad del fluido. Al ocurrir esta situación, habría que parar el proceso y limpiarlo, lo que supondría un coste adicional. Si se tiene en cuenta esto en el diseño, el coste será menor [web]. Un factor que influye también en la suciedad es la humectación, debido a que, si el fluido circula a velocidades bajas y la pared no se encuentra húmeda, existe mayor probabilidad de que se produzca suciedad en la pared del evaporador [17].

- Viscosidad y solubilidad del fluido

Cuanto más viscoso sea el fluido, menor será el coeficiente de transferencia de calor, por lo que será más conveniente elegir un modelo cuyo coeficiente de transferencia sea elevado. Además de que para una alta viscosidad se necesita una mayor temperatura, aspecto que tampoco beneficia a el proceso [21].

Respecto a la solubilidad, es la capacidad que tiene un componente de poder disolverse en un líquido determinado, esto aumenta cuanto mayor sea la temperatura. En la evaporación si se aumenta la concentración del líquido sobrepasando el límite de solubilidad, esto puede causar cristalización, provocando que no se realice bien el proceso y disminuya el rendimiento [22].

1.2.2 Tipos de evaporadores

Dependiendo de las propiedades del proceso y del fluido a evaporar, se elegirá el modelo más adecuado. En la actualidad existe una gran variedad de modelos de evaporadores en la industria, de los cuales los más usados o

característicos son los siguientes:

➤ De circulación natural

Estos tipos de evaporadores destacan por no usar bombas o ventiladores para impulsar el fluido. En este caso, es conveniente usar fluidos limpios (sin una gran cantidad de sales o sólidos que se puedan depositar) y que no sean viscosos ya que la circulación no es realmente buena, y, por último, que sean termodinámicamente estables a la temperatura a la que se opera.

Existen diferentes modelos con circulación natural:

- De tubo horizontal:

Es de los modelos más antiguos. Su funcionamiento como se aprecia en la Figura 1-9 (a), el vapor caliente entra por los tubos mientras que la alimentación se queda en el depósito, esto sólo ocurre en este caso, normalmente el producto va por los tubos y el fluido que aporta el calor va por el exterior. Cuando este fluido se calienta, la cantidad evaporada sale por la parte superior, donde se encontrará con deflectores que cuya función es impedir que salgan las gotas del líquido. Este equipo opera de manera continua y es relativamente económico. Preferiblemente se deben usar líquidos que no precipiten partículas que produzcan incrustaciones [17].

Otro tipo de evaporador de tubo horizontal es el evaporador de película pulverizada (spray-film), mostrado en la Figura 1-9 (b). En este caso la alimentación es rociada a través de unos aspersores en el interior de la carcasa. En la parte inferior del equipo se encuentran unos tubos horizontales por donde se hace circular el vapor caliente. [23].

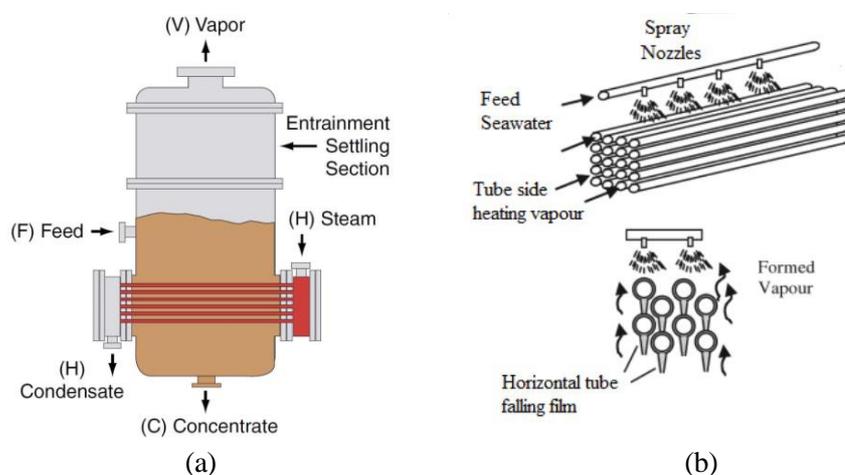


Figura 1-9. Tipo de evaporador, (a) de tubos horizontales, (b) de tubos horizontales pulverizados [17, 23].

- De tubo vertical corto

Este tipo de evaporador de circulación natural es un modelo antiguo, pero a pesar de ello, se sigue utilizando en la actualidad. En este caso, por los tubos circula el fluido a separar, la alimentación, mientras que el fluido que aporta el calor pasa a través de las láminas que rodean a los tubos, como se aprecia en la Figura 1-10 (a). En este equipo la velocidad de fluido que aporta calor es mucho mayor que la velocidad de la alimentación, provocando que la circulación y cambio de temperatura sea más rápido. La circulación del líquido en la carcasa se produce por la diferencia de densidades, esto hace que el líquido suba por los tubos y luego descienda por la parte central del evaporador, provocando un aumento en el coeficiente de transferencia [17].

El aspecto más importante es el nivel del líquido, ya que el coeficiente de transferencia de calor depende

de ello, y si el nivel del líquido es más bajo que los tubos se produce una humectación fragmentada, que provocaría manchas y disminuiría la capacidad de evaporación. Lo ideal es que el nivel del líquido se encuentre en la mitad de los tubos. Sin embargo, si el fluido contiene gran cantidad de sales o puede depositar escamas, el nivel del líquido será necesario que este por encima de los tubos para evitar que ocurra la cavitación. Otra forma de evitar la cavitación es instalar en la parte inferior del evaporador una hélice, incluso de esta manera se podría introducir productos cristalinos. Uno de los usos más comunes son los zumos, líquidos que contengan sal, sosa cáustica u otros tipos de sales. [24].

- De tubo vertical largo

Ese tipo de evaporador puede ser de película ascendente (rising-film), representada en la Figura 1-10 (b), o de película descendente (falling-film). El funcionamiento es similar al anterior evaporador, a diferencia de la longitud de los tubos, en este caso son más largos. En el caso del evaporador de película ascendente el vapor se introduce por la parte superior, y cuando es de película descendente se introduce por la parte inferior. Por los tubos de este equipo circula la alimentación y al tener tanta longitud hace que aumente la velocidad del fluido, aumentando así el coeficiente de transferencia de calor. En la parte superior de este equipo se suelen encontrar reflectores como en el evaporador horizontal, para que sólo salga el vapor. La mayor ventaja es la gran superficie que tiene de calentamiento, a pesar de el volumen que ocupa verticalmente. Si la cantidad del fluido de alimentación es pequeña puede recircularse y aumentar la eficiencia. Es muy utilizado ya que la capacidad unitaria que procesa este modelo es mayor que los anteriores y su coste de construcción no es alto. Uno de sus usos es para adquirir la leche condensada o diferentes licores [24].

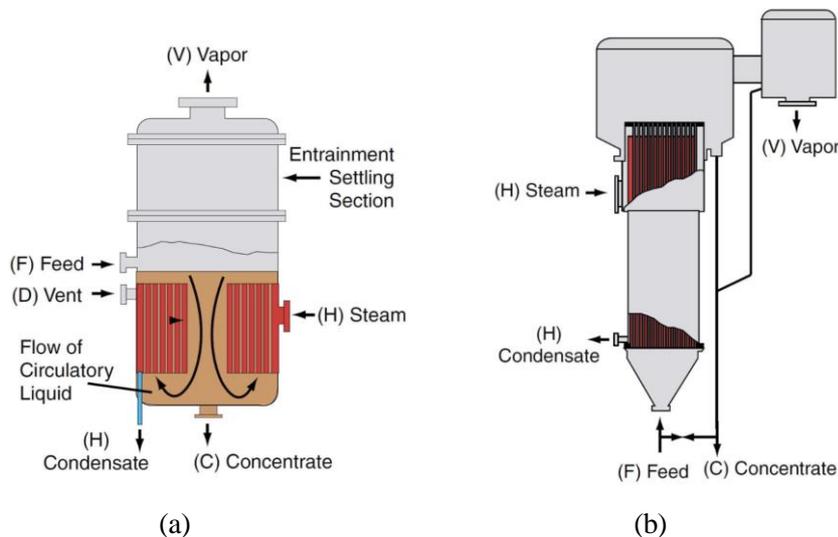


Figura 1-10. Tipo de evaporador, (a) de tubos verticales cortos, (b) de tubos verticales largos [17].

Estos evaporadores son más usados cuando los líquidos son limpios y no son sensibles a la temperatura, ya que el coeficiente de transferencia de calor es bajo al ser de circulación natural.

➤ **De circulación forzada**

Un evaporador de circulación forzada implica la utilización de una bomba o un equipo para impulsar o extraer los fluidos. Como se puede apreciar en la Figura 2-2, es un modelo parecido a la circulación natural de tubos largos, con la aportación de la bomba y unos tubos un poco más cortos. Estos fluidos pueden contener sólidos, pueden ser viscosos o salados, incluso que puedan producir la cristalización o escamas. La velocidad del fluido es tan alta que se reduce la suciedad y hace que se mantenga la misma capacidad de evaporación, disminuyendo el número de veces de limpieza del evaporador. Al tener altas velocidades provoca que los coeficientes de transferencia de masa sean mayores, pero estas velocidades están limitadas por el efecto de corrosión y erosión que pueden producir. El coste de estos equipos será mayor por el coste material y además eléctrico (la potencia

que necesite la bomba...), a pesar de esto, se puede recircular el fluido para reducir el coste. Se puede usar para muchos de los procesos, pero principalmente para el proceso de sulfato de sodio, urea.... Si se alimenta con más concentraciones de las previstas, puede perjudicar a la circulación en el equipo y, además, puede taponar los tubos a la entrada [19].

Estos fluidos normalmente tienen suciedad o son viscosos, por ello se hace uso de una bomba para poder impulsar el fluido y así circular mejor, además de reducir la suciedad por la alta velocidad [19].

➤ Evaporador de pared fina agitada (Agitated thin-film evaporators)

Este tipo de evaporador, se suelen utilizar para procesar fluidos cuyas propiedades provocan problemas en la circulación (viscosidad, suciedad...). El fluido se introduce por la parte superior de la torre, como se puede observar en la Figura 1-11 (a). Mientras éste desciende se encuentra en régimen turbulento gracias al rotor, que se encuentra en el centro de la columna, el cual posee unas palas o también llamadas rascadores, cuya función es distribuir el fluido por la pared, creando una película fina pegada a esta. Además de esto, la torre se encuentra encamisada por donde circula el fluido que aporta el calor. El coeficiente de transferencia de calor tiene un valor alto debido al encontrarse el fluido en régimen turbulento, como se ha mencionado. Todo esto, provoca que la alimentación se evapore y se separe rápidamente mientras está en continuo movimiento. El concentrado sale del evaporador por la parte inferior y por la parte superior el vapor. Normalmente este equipo opera en condiciones de vacío y es muy utilizado para líquidos con dificultad en la circulación y tiene un coste económico elevado [25].

Es un método muy eficaz para los fluidos que son sensibles a la temperatura y son viscosos, debido a la velocidad del fluido y al poco tiempo de residencia. El inconveniente es que tiene un alto coste y mantenimiento [20].

➤ Evaporador de película ascendente / descendente (Rising / falling evaporator)

Evaporador de película ascendente / descendente, combina ambos modelos para adquirir las ventajas de los dos equipos individuales, como se observa en la Figura 1-11 (b). Primero, por la zona ascendente, se introduce por su parte inferior el fluido, éste comienza a subir y el líquido que no se ha evaporado desciende llegando a un separador, y es aquí donde se produce la separación del vapor y del líquido. El coeficiente de transferencia de calor en este modelo es mayor que en los otros dos modelos individuales (ascendente y descendente). Este equipo también es usado cuando existe una limitación respecto a su altura. La alta velocidad que tiene el fluido en los tubos (menos tiempo de residencia), permite usar productos que sean sensibles a la temperatura por la rapidez del proceso. Si es verdad que en algunas ocasiones se debe de recircular. No se recomienda usar fluidos que puedan depositar sales o escamas [25].

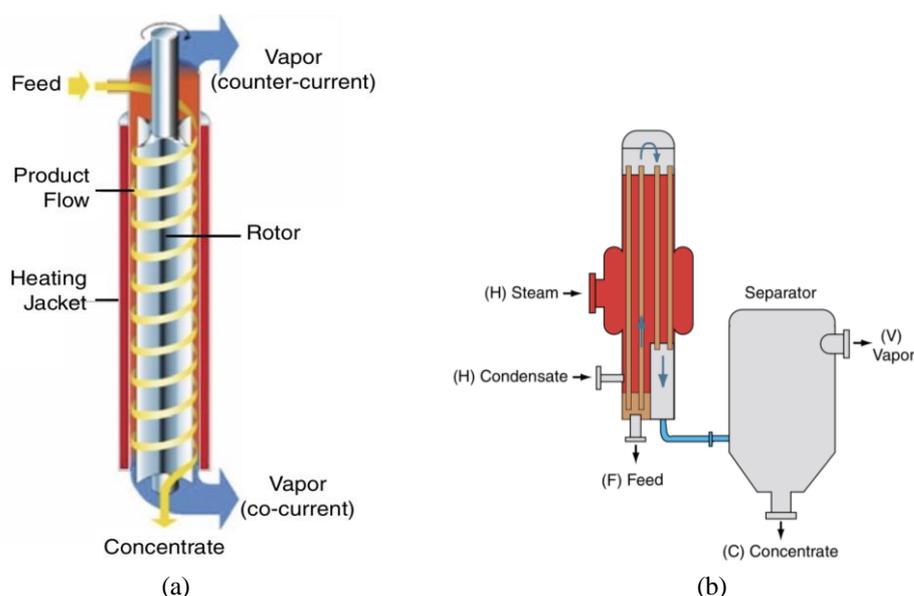


Figura 1-11. Tipo de evaporador, (a) de película fina agitada, (b) de película ascendente /descendente [17].

A modo de resumen, en la Tabla 1-3 se pueden encontrar las características de los diferentes tipos de equipos:

Tabla 1-3. Evaporador en función del proceso [26]

Tipo de evaporador	Capacidad de fluido	Tiempo de residencia	Recirculación	Coste
Circulación natural, horizontal	Baja	Normal	Se puede	Pequeño
Circulación natural, vertical tubos cortos	Baja	Mucho	Sí	Pequeño
Circulación natural, vertical tubos largos	Alta	Corto	Se puede	Alto
Circulación forzada	Alta	Normal	Se puede	Muy alto
De pared fina agitada	Alta	Corto	No	Alto
De película ascendente / descendente	Alta	Corto	Se puede	Moderado

A la hora de elegir un evaporador, se elige principalmente según las propiedades del fluido, aunque también hay otros factores que se tienen en cuenta, por ejemplo: la capacidad para evaporar, el espacio disponible en la planta, el mantenimiento, el coste.... Las propiedades del fluido a tener en cuenta se pueden apreciar en la Tabla 1-4:

Tabla 1-4. Evaporador en función del proceso [26]

Tipo de evaporador	Cristales / sólidos	Suciedad	Espuma	Sensibilidad a la temperatura	Viscosidad
Circulación natural, horizontal	No	No	No	No	No
Circulación natural, vertical tubos cortos	Regular	Regular	No	No	No
Circulación natural, vertical tubos largos	No	Regular	No	No	No
Circulación forzada	Sí	Sí	Sí	No	Sí
De pared fina agitada	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
De película ascendente / descendente	No	Regular	Sí	Sí	Regular

1.2.3 Disposición de los evaporadores

En los procesos industriales se puede encontrar un equipo que se encargue de todo el proceso de separación de evaporación, llamado efecto simple, o también, podría haber varios equipos que hagan conjuntamente este proceso, llamado efecto múltiple.

➤ Efecto simple

Cuando se usa esta disposición puede ser por varias razones, por requerir sólo una pequeña cantidad del producto, porque el vapor sea lo suficientemente barato o porque se encuentre contaminado cuando se haya utilizado por primera vez, y no pueda volver a usarse. Además, si nuestra alimentación es corrosiva, el material del equipo será de un coste más elevado. En este caso, la relación del vapor usado por agua evaporada aumenta por encima de la unidad [24].

➤ Efecto múltiple

El principal uso de este modelo es la reducción del coste económico que se produce. Para que se consiga evaporar mayor cantidad de alimentación sin mucha cantidad de vapor, se introduce la alimentación a una temperatura cercana a la de ebullición, para así cuando en el primer equipo se evapora, el vapor de agua generado sirva como fluido caloportador. Consiguiendo así que se evapore agua en el siguiente equipo. Cuanto más número de equipos haya, más superficie de transferencia habrá. Pero esto puede también ser un problema, ya que si se colocan más cantidad de equipos de los debidos provocará una disminución en la diferencia de temperaturas. Esto se puede evitar haciendo unos buenos análisis y balances de materia y energía, pero esto sólo servirá de guía de lo que ocurre en los evaporadores, ya que cuando empiece a funcionar los evaporadores fijarán su propio equilibrio. Esta disposición funciona de manera continua [24].

Existen varios tipos de efectos múltiples, dependiendo por dónde se introduce la alimentación:

- Alimentación directa (forward feed)

Significa que los equipos se encuentran en serie, y el producto de uno es la alimentación del siguiente. Esto hace que la concentración final se consiga más rápidamente. Debería utilizarse cuando el fluido introducido está caliente, en caso contrario este líquido debería pasar antes a través de evaporadores intermedios. Este tipo de efecto múltiple es el más simple [25].

- Alimentación a contracorriente (backward feed)

Los evaporadores siguen encontrándose en serie, pero esta vez la alimentación es introducida en el último equipo. En este caso, es necesario el uso de bombas ya que se hará pasar el líquido desde los equipos con menos presión a los que tiene la presión más alta. Este modelo suele usarse cuando la alimentación es fría, porque no es necesario que tenga una temperatura tan alta como en el caso anterior [25].

- Alimentación mixta (mixed feed)

Como se puede apreciar en la Figura 1-13 (a), la alimentación es introducida en la zona intermedia de los equipos, para después ser impulsada por una bomba hacia adelante, y luego hacia atrás, haciendo que aumente su concentración a una mayor temperatura. Este modelo es para líquidos característicos, a una concentración y temperatura intermedia. Se usan menos bombas que en backward feed [25].

- Alimentación en paralelo (parallel feed)

A diferencia de los otros tres tipos, aquí los equipos se encuentran en paralelo. Este modelo se usa cuando se tiene una concentración muy elevada en la alimentación. El producto que se obtiene es sólido y se obtiene de una mezcla entre todos los equipos [25].

Como representación de los evaporadores de múltiple efecto se disponen de las Figuras 1-12 y 1-13.

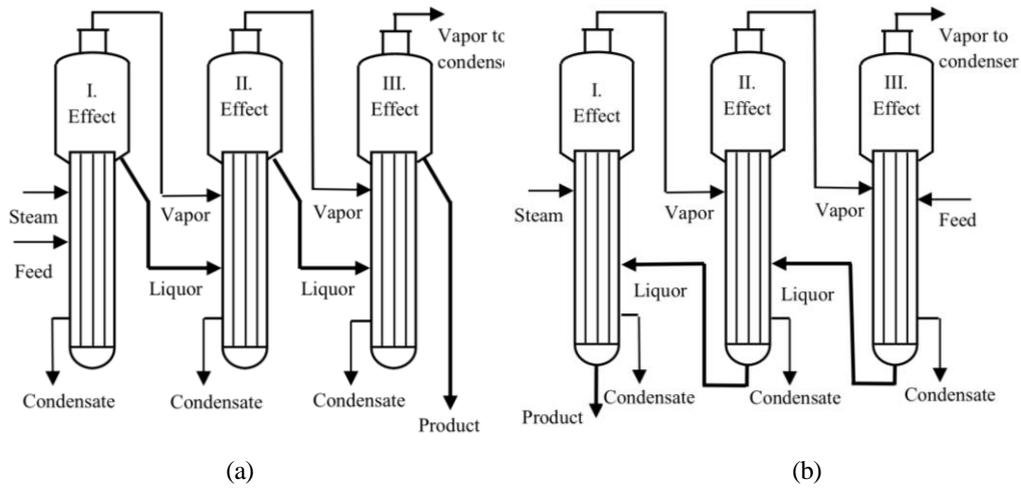


Figura 1-12. Tipo de evaporador de efecto múltiple, (a) directa, (b) a contracorriente [27].

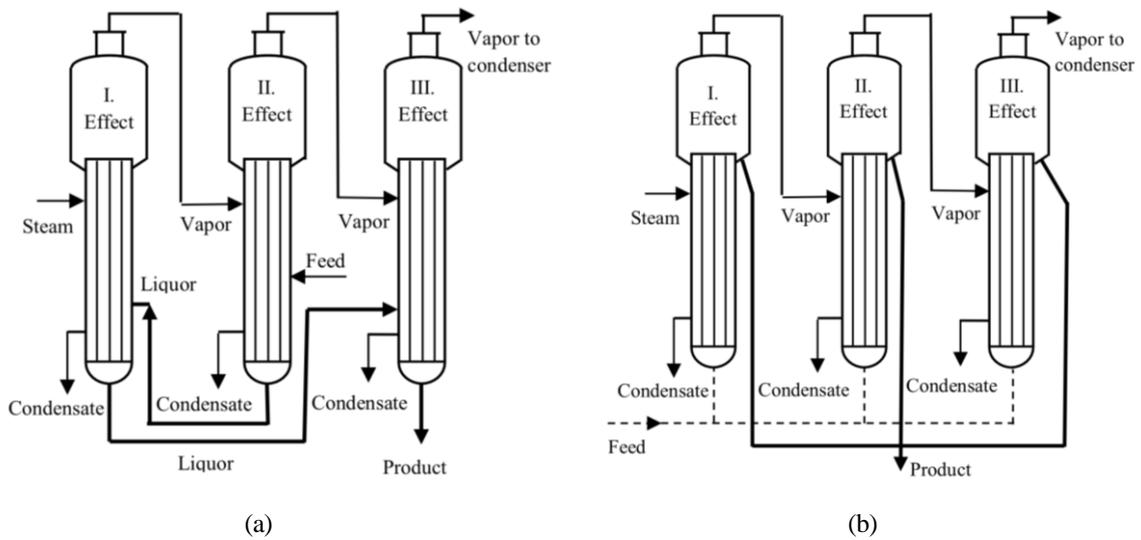


Figura 1-13. Tipo de evaporador de efecto múltiple, (a) mixta, (b) en paralelo [27].

2 EFLUENTE SELECCIONADO PARA EL ESTUDIO

El efluente escogido para este estudio es el agua perteneciente al Mar Muerto, que se sitúa en oriente medio, compartido por Jordania e Israel. Su característica principal consiste en ser la superficie marina con mayor grado de salinidad en el mundo. La cantidad de sales es tan elevada que no permite que exista ningún tipo de vida acuática en él, de ahí su nombre.

Esto ocurre debido a que desembocan ríos como el río Jordán o el río Yarmuk y sin embargo, no tiene efluentes que salgan y vayan hacia otros lagos o mares. Por este motivo, las aguas que llegan de los ríos se depositan allí y acompañado de un clima cálido y seco durante todo el año genera que se evapore mayor cantidad de agua, provocando que se concentren las sales y éste posea una alta salinidad [28].



Figura 2-1. Mar Muerto [29]

Como se aprecia en la Figura 2-1, las sales se van acumulando hasta incluso formar esa superficie blanca. La cantidad de sales es mayor del 24%, cuando las demás superficies marinas tienen alrededor de un 3,5%. Aparte de las sales que contiene este mar, posee altas cantidades de elementos como son: el calcio, el potasio, el magnesio o el bromo.

Al ser tan elevada la temperatura en la región de Oriente Medio, el clima provoca que se evaporen los recursos hídricos con mayor rapidez que en otros mares o lagos, esto ha provocado la búsqueda de soluciones alternativas para satisfacer las necesidades.

Este lago salado es una oportunidad única para obtener agua pura. Sin embargo, a pesar de su elevada salinidad y singular composición por su variedad en minerales, la convierten en un desafío. Los procesos convencionales de desalinización, como la ósmosis inversa no se pueden emplear, ya que al tener una gran cantidad de sal y ser los poros de la membrana tan pequeños, ésta se vería obstruida y deteriorada en muy poco tiempo. Lo que llega a explorar otros métodos adaptados a las características del Mar Muerto.

➤ Parámetros

La densidad tiene un valor de 1240 kg/m^3 , más elevado que el agua pura (997 kg/m^3), lo que hace que aumente la flotabilidad [30]. Por otro lado, la viscosidad también es mayor en el Mar Muerto, contiene un valor de $3,6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$. Otros de los parámetros a destacar son: la conductividad térmica ($0,00181 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$), la capacidad calorífica ($3030 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) o la actividad (0,371) [31-33].

La cantidad de sales en el agua del Mar Muerto están recogidas en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Composición de sales en el Mar Muerto [34]

Cloruro de sodio	86	g/L
Cloruro de magnesio	132	g/L
Cloruro de calcio	35	g/L
Cloruro de potasio	11	g/L
Bromuro de potasio	9	g/L
Sulfato de calcio	7	g/L
Otras	20	g/L

Actualmente, a las orillas de este mar se encuentran varias industrias cuya finalidad es desalinizar el agua y extraer los minerales que ella contiene, como por ejemplo Dead Sea Works., que usa la evaporación para extraer las sales.

En resumen, este fenómeno de la naturaleza aparte de ser un lugar turístico asombroso, para la tecnología e industria es un nuevo campo de exploración, que asegura prometedores avances y satisface las necesidades en los suministros de aguas y obtención de nuevos minerales.

En este estudio se va a hacer una comparación entre la destilación con membranas y la evaporación, y ver cuál de estas operaciones de separación es más competitiva, cuando se aplican al agua del Mar Muerto.

3 ECUACIONES DE BALANCE Y CÁLCULOS PARA LA COMPARATIVA ALTERNATIVAS EFLUENTE (DM VS EVAPORACIÓN)

3.1 Balances en la Destilación con membranas

Los diferentes balances en este proceso de separación son los siguientes:

➤ Equipo de la destilación con membrana

En este equipo no se encuentran los balances de energía y materia por separado, ya que todo se encuentra en un balance conjunto, debido a que el transporte de masa a través de la membrana es gracias a la diferencia de presiones de vapor.

Este balance está basado en la revisión sistemática: “*Heat and Mass Transport in Modeling Membrane Distillation Configuration: Review*” de Olatunji y Camacho (2018) [11].

Consideraciones iniciales.

Para empezar el balance, hay que tener en cuenta algunos aspectos de diseño que afectan al balance. Para ello se ha considerado utilizar la configuración DCMD, usando una membrana PVDF y teniendo unas temperaturas en la zona caliente y en la zona fría de 80°C y 20°C respectivamente. A continuación, se enumeran las principales:

- Utilización de la configuración de destilación con membranas en contacto directo (DCMD). Se ha seleccionado este tipo de contacto porque se utiliza para separar partículas no volátiles y es más económico que las otras configuraciones.
- Uso de una membrana PVDF, ya que no tiene una conductividad alta y posee una buena resistencia e hidrofobicidad.
- Temperatura de alimentación a 80°C. Esta temperatura se ha supuesto manteniendo un margen de 60°C entre la zona fría y la zona caliente.
- Temperatura del líquido frío a 20°C, haciendo pasar agua pura.

Las definiciones de los parámetros que se van a usar en la destilación con membrana se pueden encontrar en el Anexo I.

La ecuación principal de este balance es la siguiente:

$$J = B_m \times (P_{fm} - P_{pm}) \quad [Ec. 2]$$

donde J es el caudal másico que atraviesa la membrana ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$), B_m es una constante del proceso que depende dos efectos: el efecto Knudsen y la difusión molecular, y P_{fm} y P_{pm} , las cuales son las presiones que existen en los dos lados de la pared de la membrana (Pa).

Estas presiones se calculan a partir de las presiones parciales (calculadas con la ecuación de Antoine, Ecuación 3) y la actividad del líquido en cada zona (Ecuación 4):

$$P_{im}^{\circ}(Pa) = \exp\left(A - \frac{B}{C + T_{im}(K)}\right) \quad [Ec. 3]$$

i puede ser f de feed (alimentación) o p de permeate (permeado). Los parámetros A , B , y C son constantes que dependen del tipo de fluido, en este caso: $A = 23,2$ / $B = 3878,6$ / $C = -43,2$. T_{im} es la temperatura a cada lado de la pared de la membrana y P_{im}° es la presión de vapor para las diferentes zonas.

Los valores de temperatura en cada lado de la pared de la membrana no se conocen. Por tanto, para resolver el balance se hará uso de un proceso iterativo. En primer lugar, se suponen valores aproximados, más adelante se obtendrán estas temperaturas, y si la diferencia tiene un error menor de 10^{-5} , la aproximación es correcta, sino habría que iterar hasta que se cumpliera ese margen de error.

$$P_{im} = a_{iw} \times P_{im}^{\circ} \quad [Ec. 4]$$

donde a_{iw} es la actividad y P_i la presión de ambos lados de la membrana (Pa).

Obteniendo estas presiones, sólo falta hallar la constante B para obtener la cantidad de flujo que atraviesa la membrana, J . Para calcular B hay que obtener los parámetros λ y Kn para saber que efecto predomina. Siendo:

$$Kn = \frac{\lambda}{dp} \quad [Ec. 5]$$

$$\lambda = \frac{k_B \cdot T_m}{\sqrt{2} \cdot P_m \cdot \sigma_v^2} \quad [Ec. 6]$$

donde k_B es la constante de Boltzmann, cuyo valor es $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$, T_m es la temperatura a la que se encuentra la membrana, es la temperatura media entre la temperatura de un lado y del otro (K), P_m es el promedio de la presión en los poros de la membrana (Pa), σ_v es el diámetro de la colisión de vapor de agua, el cual tiene un valor de $0,264 \text{ nm}$, y dp es el diámetro de los poros de la membrana.

En el caso de que $\lambda > dp$ o $Kn > 1$, predomina el efecto Knudsen y se utilizaría la Ecuación 7:

$$B_m^{kd} = \frac{\varepsilon \cdot dp}{3 \cdot \tau \cdot \delta m} \times \sqrt{\frac{8 \cdot M_w}{\pi \cdot R \cdot T_m}} \quad [Ec. 7]$$

donde ε indica la porosidad de la membrana, δm es el grosor de la membrana (m), τ es la tortuosidad de la membrana, M_w es el peso molecular del fluido de una molécula de vapor de agua (kg/mol), y R es la constante universal de los gases ($\text{J/mol} \cdot \text{K}$), cuyo valor es $8,314$.

Por otro lado, predomina la difusión molecular cuando $\lambda < 0,01 \cdot dp$ o $Kn < 0,01$:

$$B_m^{mo} = \frac{\varepsilon \cdot P_T \cdot D_{wa} \cdot M_w}{\tau \cdot \delta m \cdot P_a \cdot R \cdot T_m} \quad [Ec. 8]$$

donde D_{wa} es el coeficiente de difusividad entre el agua y el aire (m^2/s), P_a es la presión media del gas en el interior de la membrana (Pa), P_T indica la presión total (Pa).

Por último, si los valores de λ y Kn se encuentran en valores intermedios ($0.01 \cdot dp < \lambda < dp$ o $0.01 < Kn < 1$), se deben de tener en cuenta los dos efectos:

$$B_m^T = \left[\frac{3 \cdot \tau \cdot \delta m}{\varepsilon \cdot dp} \times \sqrt{\frac{\pi \cdot R \cdot T_m}{8 \cdot M_w} + \frac{\tau \cdot \delta m \cdot P_a \cdot R \cdot T_m}{\varepsilon \cdot P_T \cdot D_{wa} \cdot M_w}} \right]^{-1} \quad [Ec. 9]$$

El producto de $P_T \cdot D_{wa}$, se puede aproximar a la siguiente ecuación:

$$P_T \cdot D_{wa} = 1,9 \times 10^{-5} \times T_m^{2,072} \quad [Ec. 10]$$

Obteniendo el valor de la constante B y las presiones de cada lado de la membrana, se puede calcular la cantidad de masa que llega a la zona de permeado, J, con la Ecuación 2.

Ahora se procede a hallar los valores que se han supuesto anteriormente de las temperaturas que existen en cada lado de la membrana. Además de calcular el calor que se transfiere en cada zona (la zona de alimentación, la zona del permeado y en el interior de la membrana), estos valores en un régimen estacionario son iguales para la configuración seleccionada, es decir:

$$Q_f = Q_m = Q_p \quad [Ec. 11]$$

donde estos son los calores transferidos en la zona de alimentación (Q_f), en la zona de permeado (Q_p), y en el interior de la membrana (Q_m), cuyas unidades son W/m^2 .

Para calcular estos valores, se necesitan hallar los coeficientes de transferencia de calor, y para ello saber el número de Reynolds y número de Prandtl de la zona de alimentación y zona de permeado.

$$Re_i = \frac{\rho_i \times v \times d_h}{\mu_i} \quad [Ec. 12]$$

$$Pr_i = \frac{Cp_i \times \mu_i}{k_m} \quad [Ec. 13]$$

Donde ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), μ indica la viscosidad del fluido ($Pa \cdot s$), d_h es el diámetro hidráulico (m), v es la velocidad del fluido (m/s), Cp es la capacidad calorífica del fluido ($J/kg \cdot K$) y k_m es la conductividad térmica de la membrana ($W/m \cdot K$)

Para calcular la conductividad térmica de la membrana hace falta saber la conductividad térmica del gas (k_g), la porosidad y la conductividad térmica del material de la membrana (k_{mm}), que ésta se calcula a través de unos parámetros (α y β). Como se puede apreciar en las siguientes ecuaciones:

$$k_m = (1 - \varepsilon) \times k_{mm} + \varepsilon \times k_g \quad [Ec. 14]$$

$$k_{mm} = \alpha \times 10^{-4} \times T_m + \beta \times 10^{-2} \quad [Ec. 15]$$

Estos parámetros se pueden apreciar en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Tipos de polímeros y parámetros [11]

Tipo de polímero	PVDF	PTFE	PP
α	5,77	5,77	12,5
β	0,914	8,914	-23,5

Obteniendo todos estos valores y los números de Reynolds y Prandtl, se puede apreciar en que régimen se encuentra, tanto en la zona de alimentación como en la zona de permeado.

En el caso de que sea un régimen laminar ($Re < 2300$), se usa la correlación del número de Nusselt de la Ecuación 16:

$$Nu_{f,p} = 1,62 \times \left(Re_{f,p} \times Pr_{f,p} \times \left(\frac{d_h}{L} \right) \right)^{\frac{1}{3}} \quad Re_{f,p} < 2300 \quad [Ec. 16]$$

donde L es la longitud del módulo de la membrana (m).

En caso contrario, si el número de Re es mayor que 2300, se encuentra en régimen turbulento y la correlación adecuada es Ecuación 17:

$$Nu_{f,p} = 0,023 \times Re_{f,p}^{\frac{4}{5}} \times Pr_{f,p}^{\frac{1}{3}} \quad Re_{f,p} > 2300 \quad [Ec. 17]$$

Usando la correlación adecuada para el proceso, se obtiene el número de Nusselt. Gracias a esto, se puede calcular el coeficiente de transferencia de calor de lado de la membrana (h), con la Ecuación 18:

$$h_i = \frac{Nu_i \times k_i}{d_h} \quad [Ec. 18]$$

donde k_i es la conductividad térmica del fluido que se encuentra en cada zona, (en la zona de alimentación (k_f) y en la zona de permeado (k_p)) cuyas unidades son $W/m \cdot K$.

Finalmente, se procede a calcular las temperaturas en los dos lados de la membrana:

$$T_{fm}(K) = \frac{h_m \times \left(T_{bp} + \frac{h_f}{h_p} \times T_{bf} \right) + h_f \times T_{bf} - J \times \Delta H_V}{h_m \times \left(1 + \frac{h_f}{h_p} \right) + h_f} \quad [Ec. 19]$$

$$T_{pm}(K) = \frac{h_m \times \left(T_{bf} + \frac{h_p}{h_f} \times T_{bp} \right) + h_p \times T_{bp} + J \times \Delta H_V}{h_m \times \left(1 + \frac{h_p}{h_f} \right) + h_p} \quad [Ec. 20]$$

siendo T_{bf} la temperatura a la que se encuentra en la zona de alimentación (K), y T_{bp} , en la zona de permeado (K), ΔH_V es el calor latente de evaporación (J/kg) y h_m es el coeficiente de transferencia de calor en la membrana ($W/m^2 \cdot K$), el cual se obtiene gracias a la Ecuación 21:

$$h_m = \frac{k_m}{\delta_m} \quad [Ec. 21]$$

Teniendo estos datos, ya se puede calcular el calor transferido en todas las zonas.

$$Q_f = h_f \times (T_{bf} - T_{fm}) \quad [Ec. 22]$$

$$Q_m = h_m \times (T_{fm} - T_{pm}) + J \times \Delta H_v \quad [Ec. 23]$$

$$Q_p = h_p \times (T_{pm} - T_{bp}) \quad [Ec. 24]$$

➤ Datos de la destilación con membrana

Como ya se ha visto, es necesario disponer de algunos datos relativos a la membrana. En el caso de la membrana PVDF, estos datos se han obtenido de una empresa, representados en la Tabla 3-2 [35]:

Tabla 3-2. Parámetros de la membrana

Nombre	Valor	Unidades
ε (porosidad)	0,70	-
δ_m (grosor)	$1,25 \times 10^{-4}$	m
d_p (diámetro del poro)	$4,5 \times 10^{-5}$	m
d_f (diámetro del filtro)	47	mm
Caudal máximo	4	L/min·cm ²

Por otro lado, es necesario conocer algunos datos del fluido que se alimenta a la instalación. En este caso, el del agua del Mar Muerto. Estos datos se muestran en la Tabla 3-3:

Tabla 3-3. Parámetros del Mar Muerto

Nombre	Valor	Unidades
ρ (densidad)	1,24 [30]	kg/L
μ (viscosidad)	3,6 [36]	mPa·s
C_p (capacidad calorífica)	3030 [31]	J/kg·K
a (actividad)	0,371 [32]	-
k_f (conductividad térmica)	0,00181 [33]	cal/cm·s·°C

Los datos necesarios sobre el agua que se hace pasar por la zona de perneado, el agua a 20°C, están representados en la Tabla 3-4:

Tabla 3-4. Parámetros del agua pura

Nombre	Valor	Unidades
ρ (densidad)	998 [37]	kg/L
μ (viscosidad)	$1,02 \times 10^{-3}$ [37]	kg/m·s
Cp (capacidad calorífica)	4183	J/kg·K
a (actividad)	1	-
k_p (conductividad térmica)	0,598 [38]	W/m·K

Además de los anteriores, es necesario conocer algunos datos como el calor latente de vaporización, el rendimiento o la conductividad térmica del vapor. Estos datos se ven en la Tabla 3-5:

Tabla 3-5. Otros parámetros

Nombre	Valor	Unidades
ΔH_v (calor latente de vaporización)	2260 [39]	J/kg
η (eficiencia de la membrana)	98	%
T_{bf} (temperatura de la alimentación en la zona de alimentación)	353	K
T_{bp} (temperatura del fluido enfriado en la zona de permeado)	293	K
k_g (conductividad térmica del vapor)	23,5 [40]	mW/m·K

➤ Equipo de calentamiento

Para calcular el calor necesario que hay que aportar (Q_{cal}) se obtiene con las siguientes ecuaciones [3]:

$$Q_{cal} = m \times C_p \times (T_{bf} - T_o) \quad [Ec. 25]$$

$$m = Q_{liq} \times \rho \quad [Ec. 26]$$

donde m es el caudal másico del agua a calentar (g/s), C_p es la capacidad calorífica (kJ/kg·°C), T_{bf} es la temperatura de alimentación al módulo de la destilación con membranas (K), T_o es la temperatura inicial para calentar (K), Q_{liq} es el caudal volumétrico (kg/h), y ρ es la densidad del fluido de agua a 25°C (kg/m³).

Los valores de estos parámetros están mostrados en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Parámetros del equipo de calentamiento

Nombre	Valor	Unidades
C_p (capacidad calorífica)	3,03	kJ/kg·°C
T_{bf} (temperatura de la alimentación en la zona de alimentación)	80	°C
T_o (temperatura inicial)	25	°C
Q_{liq} (caudal volumétrico)	775	kg/h
ρ (densidad)	1240	kg/m ³

➤ Equipo de enfriamiento

Se hace pasar agua pura por este equipo para reducir su temperatura. La energía necesaria para que esto suceda, se calcula con la Ecuación 27 [3].

$$Q_{enf} = m \times C_p \times (T_{bp} - T_{wp}) \quad [Ec. 27]$$

donde m es el caudal másico del agua a enfriar (g/s), T_{bp} es la temperatura a la que se introduce a la zona de permeado (K), T_{wp} es la temperatura inicial de enfriamiento (K), Q_{liq} es el caudal volumétrico del agua pura (kg/h), y ρ es la densidad del fluido del agua a 25°C (kg/m³).

Los valores que se necesitan para el equipo de enfriamiento están en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Parámetros del equipo de enfriamiento

Nombre	Valor	Unidades
C_p (capacidad calorífica)	4,816	kJ/kg·°C
T_{bp} (temperatura del líquido frío en la zona de permeado)	20	°C
T_{wp} (temperatura del agua pura)	40	°C
Q_{liq} (caudal volumétrico)	775	kg/h
ρ (densidad)	997	kg/m ³

3.2 Balances en la Evaporación

El balance en este equipo se realiza sobre un evaporador simple. Se ha escogido este modelo debido a su bajo coste y su alto rendimiento usando fluidos con partículas no volátiles, cuyo esquema donde se pueden diferenciar

las corrientes de entrada y salida, es en la Figura 3-1:

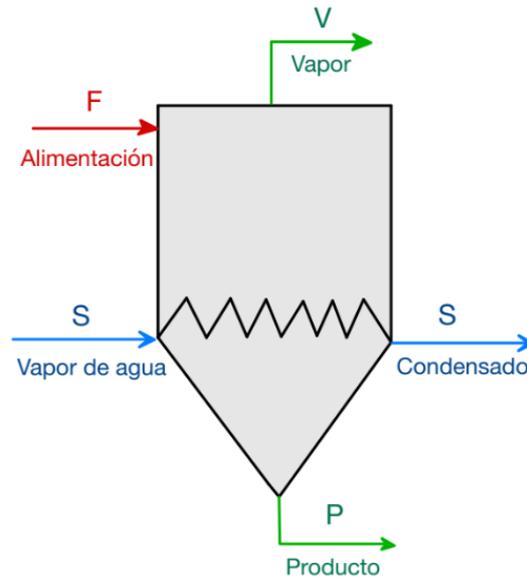


Figura 3-1. Corrientes en un evaporador simple

Se procede a desarrollar las ecuaciones del balance de materia y energía en el evaporador [41].

➤ Balance de Materia

Balance de los caudales:

$$F = P + V \quad [Ec. 28]$$

Balances de la composición de las sales:

$$F \times x_F = P \times x_P + V \times x_V \quad [Ec. 29]$$

donde F es el caudal másico de alimentación (kg/h), x_F es la composición de alimentación (kg/kg), P es la corriente del producto (kg/h), x_P es la composición del producto (kg/kg), V es la corriente del vapor (kg/h) y x_V es la composición del vapor (kg/kg).

Aquí se ha considerado que x_V tiene un valor de 0, ya que la temperatura de ebullición de las sales es mucho más elevada que el agua, y, por tanto, serán partículas no volátiles.

➤ Balance de Energía

El balance de energía en el evaporador se calcula igualando la energía que entra a la que sale.

$$F \times h_F + S \times \lambda = P \times h_P + V \times h_V \quad [Ec. 30]$$

$$\lambda = (h_{Se} - h_{Ss}) \quad [Ec. 31]$$

donde h_F es la entalpía de alimentación (kJ/kg), h_P es la entalpía del producto (kJ/kg), h_V es la entalpía del vapor (kJ/kg), S es la corriente del fluido caloportador (kg/h), λ es la diferencia de entalpías del fluido caloportador (kJ/kg), h_{Se} es la entalpía del fluido caloportador de entrada (kJ/kg) y h_{Ss} es la entalpía a la salida (kJ/kg).

El calor necesario que hubiera que aportar (Q) para que se evapore, se calcula con la ecuación 32:

$$Q = S \times \lambda \quad [Ec. 32]$$

En la Tabla 3-8 están mostrados los valores necesarios para realizar los cálculos del evaporador.

Tabla 3-8. Parámetros del evaporador

Nombre	Valor	Unidades
F (caudal másico de alimentación)	775	kg/h
x_F (composición de sales en la alimentación)	0,24	kg/kg
x_P (composición de sales en el producto)	0,98	kg/kg
x_V (composición de sales en el vapor)	0	kg/kg
h_F (entalpía de alimentación)	104,8 [42]	kJ/kg
h_P (entalpía del producto)	419 [42]	kJ/kg
h_V (entalpía del vapor)	2676 [42]	kJ/kg

4 RESULTADOS

Los resultados obtenidos en los dos diferentes procesos de separación se van a desarrollar a continuación.

4.1 Resultados de la Destilación con Membranas

A partir del modelo anteriormente explicado se van a obtener los resultados, de los cuales los que se van a utilizar en la comparación con la evaporación son:

- La cantidad de fluido que atraviesa la membrana (kg/h).
- La energía necesaria para calentar o enfriar los fluidos (kW).

Realizando los cálculos para una configuración DCMD, con una membrana PVDF y usando como fluido el agua perteneciente al Mar Muerto, los resultados se encuentran en la Tabla 4-1.

Se ha tomado como caudal de alimentación 775 kg/h, como composición se indica en la Tabla 2-1 y las características tanto del fluido como las membranas se indican en las Tablas 3-2, 3-3, 3-4 y 3-5.

Observando los parámetros λ y Kn , se aprecia que en este caso predomina la difusión molecular, ya que $\lambda < 0.01 \cdot dp$ y $Kn < 0.01$. Además, los valores de los números de Reynolds indican que la zona de alimentación se encuentra en régimen laminar y la zona de permeado en régimen turbulento, Re_f siendo 1618 y Re_p siendo 4598. Igualmente, se cumple la Ecuación 10, donde se dice que los calores que se transfieren en cada zona son iguales.

Una vez resuelto el balance, se calcula la cantidad de agua que se obtiene a la hora y la cantidad que tiene de sales. La cantidad total de kg/h que se procesan:

$$0,8518 \frac{kg}{m^2 \cdot s} \times \frac{\pi \times 0,047^2}{4} m^2 \times \frac{3600 s}{1 h} = 5,3202 \frac{kg}{h}$$

Tabla 4-1. Resumen de los valores obtenidos

Nombre	Valor	Nombre	Valor
P°_{fm}	43491,03 Pa	P°_{pm}	2149,90 Pa
P_{fm}	16135,17 Pa	P_{pm}	2149,90 Pa
λ	$4,7 \times 10^{-6}$	Kn	1×10^{-4}
B (molecular)	$9,61 \times 10^{-5} \text{ L/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$	J	$1,34 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$
Re_f	1618,89	Re_p	4598,63
Pr_f	145,24	Pr_p	56,81
Nu_f	36,08	Nu_p	75,27
h_f	$719,39 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	h_p	$957,73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
h_m	$600,83 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$	T_{fm}	332,71 K
T_{pm}	301,9 K	Q_f	$15421,00 \text{ W/m}^2$
Q_p	$15421,00 \text{ W/m}^2$	Q_m	$15421,00 \text{ W/m}^2$

Teniendo en cuenta que la membrana retiene un 98% de los solutos no volátiles. La cantidad que retiene de sales se representa en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Cantidad de sales extraídas

Cloruro de sodio	661,2558232	g/día
Cloruro de magnesio	1014,950798	g/día
Cloruro de calcio	269,115742	g/día
Cloruro de potasio	84,5792332	g/día
Bromuro de potasio	69,2011908	g/día
Sulfato de calcio	53,8231484	g/día
Otras	153,780424	g/día

➤ Equipo de calentamiento y enfriamiento

Los resultados de la energía necesaria para cada equipo están recogidos en la Tabla 4-3:

Tabla 4-3. Resultados de los equipos de calentamiento y enfriamiento

Nombre	Valor	Unidades
Q_{cal} (calentador)	36	kW
Q_{enf} (enfriador)	2,65	kW

La energía total necesaria para la destilación con membrana es de 38,65 kW.

Los valores de los parámetros a comparar se pueden observar en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4. Resultados a comparar de la destilación con membranas

Nombre	Valor	Unidades
Q (energía necesaria)	38,65	kW
P (caudal separado)	5,32	kg/h

4.2 Resultados de la Evaporación

Los resultados están mostrados en la Tabla 4-5:

Tabla 4-5. Resultados del evaporador

Nombre	Valor	Unidades
P (caudal másico de producto)	191,20	kg/h
V (caudal másico de vapor)	583,2	kg/h
Q (calor a aportar)	433	kW

Por último, la Tabla 4-6 muestra los resultados que se van a comparar:

Tabla 4-6. Resultados a comparar de la evaporación

Nombre	Valor	Unidades
Q (energía necesaria)	433	kW
P (caudal separado)	191,20	kg/h

5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este estudio se utiliza para ambas operaciones un mismo caudal de alimentación (775 kg/h) y un mismo rechazo de sales (98%). Para poder hallar en las mismas condiciones la cantidad de producto que se adquiere y la energía necesaria para llevar ambos procesos a cabo. En la Tabla 5-1 se recogen estos valores.

Tabla 5-1. Resultados a comparar

DM	Valor	Evaporación	Valor
Q	38,65 kW	Q	433 kW
P	5,32 kg/h	P	191,20 kg/h

Se aprecia que la energía consumida en la evaporación es mucho mayor que la energía que consume en el proceso de la DM. Por otro lado, la cantidad de fluido que se obtiene en la evaporación también es mayor que en la destilación con membranas.

Por cada kilogramo a la hora que se obtenga en la DM se consume 0,14kW, y en el caso de la evaporación se consumiría 0,44 kW.

6 CONCLUSIONES

En este proyecto se han recopilado las ecuaciones matemáticas que modelan dos operaciones de separación, la destilación con membrana y la evaporación, para realizar posteriormente una comparativa entre ellas usando como efluente a las aguas del Mar Muerto, tomando las mismas variables iniciales para ambos procesos, como son la cantidad de caudal a tratar y su composición. A tenor de los resultados obtenidos se puede concluir que:

- El proceso de evaporación supondría un coste energético mayor que la DM para obtener una misma cantidad de producto, ya que la destilación por kilogramo a la hora consume 0,14 kW y la evaporación consume 0,44 kW, siendo tres veces más cara la evaporación. En cambio, para una misma alimentación la cantidad de producto que se obtiene por hora en la evaporación es mucho más elevada que en la destilación con membrana.
- A pesar del menor consumo energético de la DM, al tratarse de una tecnología mucho menos desarrollada que la evaporación y siendo su implantación más costosa, debido fundamentalmente al elevado precio de las membranas, la evaporación continúa siendo una alternativa viable económicamente para este tipo de tratamientos.

Como sugerencia para futuras líneas de investigación:

- Respecto a la DM: aumentar la capacidad de producción y conseguir que la membrana sea más resistente.
- Respecto a la evaporación: disminuir el consumo de energía mediante el desarrollo de equipos más eficientes.

REFERENCIAS

- [1] “Agua en los embalses de España”, *Embalses.net*. [En línea]. Disponible en: <https://www.embalses.net>.
- [2] EpData, “Evolución del agua embalsada en los últimos dos años”. EpData - La actualidad informativa en datos estadísticos de Europa Press, 12-ago-2023.
- [3] E. S. de Tecnologia i Ciències Experimentals Grau en Enginyeria Química, “Universitat Jaume I”, *Uji.es*. [En línea]. Disponible en: https://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/186963/TFG_Vicente_Costa_Segovia.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] M. del Carmen García Payo, “Destilación en membranas de disoluciones acuosas de alcoholes”, Universidad Computense de Madrid, Madrid, 1998.
- [5] F. Carrasco y W. Platzer, *Fraunhofer.cl*. [En línea]. Disponible en: https://www.fraunhofer.cl/content/dam/chile/es/documents/csetdocument/reportes/CSET-2017-PUB-002-SP_Estudio_Tecnologia_Membrana_Destilacion-final.pdf.
- [6] L. Camacho *et al.*, “Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications”, *Water (Basel)*, vol. 5, núm. 1, pp. 94–196, 2013.
- [7] E. Curcio y E. Drioli, “Membrane distillation and related operations—A review”, *Sep. Purif. Rev.*, vol. 34, núm. 1, pp. 35–86, 2005
- [8] D. R. Lloyd, K. E. Kinzer, y H. S. Tseng, “Microporous membrane formation via thermally induced phase separation. I. Solid-liquid phase separation”, *J. Memb. Sci.*, vol. 52, núm. 3, pp. 239–261, 1990.
- [9] M. Tomaszewska, “Preparation and properties of flat-sheet membranes from poly(vinylidene fluoride) for membrane distillation”, *Desalination*, vol. 104, núm. 1–2, pp. 1–11, 1996.
- [10] F. Alessandro, F. Macedonio, y E. Drioli, “New materials and phenomena in membrane distillation”, *Chemistry (Basel)*, vol. 5, núm. 1, pp. 65–84, 2023.
- [11] S. O. Olatunji y L. M. Camacho, “Heat and mass transport in modeling membrane distillation configurations: A review”, *Front. Energy Res.*, vol. 6, 2018.
- [12] M. S. El-Bourawi, Z. Ding, R. Ma, y M. Khayet, “A framework for better understanding membrane distillation separation process”, *J. Memb. Sci.*, vol. 285, núm. 1–2, pp. 4–29, 2006
- [13] “Request Rejected”, *Vito.be*. [En línea]. Disponible en: <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/membrane-distillation>.
- [14] L. Song, Z. Ma, X. Liao, P. B. Kosaraju, J. R. Irish, y K. K. Sirkar, “Pilot plant studies of novel membranes and devices for direct contact membrane distillation-based desalination”, *J. Memb. Sci.*, vol. 323, núm. 2, pp. 257–270, 2008.
- [15] A. Sushvanth Reddy, S. Kalla, y Z. V. P. Murthy, “Textile wastewater treatment via membrane

- distillation”, *Environ. Eng. Res.*, vol. 27, núm. 5, pp. 210228–210220, 2021.
- [16] A. Kumar, S. H. Syed, y A. M. S. Pabby, “Membrane Distillation in Food Processing”, en *Handbook of Membrane Separations*, 1st Edition., Boca Ratón, FL, Estados Unidos de América: CRC Press, 2008, pp. 533–572.
- [17] “Selecting Evaporators for Process Applications”, Scribd. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/438039377/Selecting-Evaporators-for-Process-Applications>.
- [18] Edu.co. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/dbdf844f-0b4b-4f5e-9118-0df4ba761175/content>.
- [19] Studocu.com. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-politecnico-nacional/introduccion-a-los-procesos-de-separacion/diferencias-entre-simple-efecto-y-multiple-efecto/20450836>.
- [20] L. Strodtmann, R. Staud, T. Klinke, K. Jasch, y S. Scholl, “Quantification of evaporation-induced foaming ability”, *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 179, pp. 502–509, 2022.
- [21] Y. Zhang, Z. Zhang, J. Yang, Y. Yue, y H. Zhang, “Evaporation characteristics of viscous droplets on stainless steel superhydrophobic surface”, *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 183, núm. 107843, p. 107843, 2023.
- [22] D. T. Clay, “Soluble Sodium (Na) Scales”, Tappi.org. [En línea]. Disponible en: <https://www.tappi.org/content/events/08kros/manuscripts/3-3.pdf>.
- [23] Waterman Engineers Australia, “Evaporator Technique for Effluent Treatment”, *Manufacturer, Exporter and Supplier of Waste Water Treatment Plants, Zero Liquid Discharge Systems (ZLD System), Waste Incinerator Systems (Solid Liquid Waste Management), Reverse Osmosis Plants, Sea Water Desalination Plants, Effluent Recycling Plants (Effluent Treatment Plants) in Vietnam, Cambodia, Bangladesh, Indonesia, Thailand, South Korea*, 02-may-2022. [En línea]. Disponible en: <https://watermanaustralia.com/evaporator-technique-for-effluent-treatment/>
- [24] “Perry’s chemical engineers’ handbook”, Booksfree.org. [En línea]. Disponible en: https://www.booksfree.org/wp-content/uploads/2022/03/perrys-chemical-engineers-handbook-ninth-edition_compressed.pdf
- [25] P. Minton, *Handbook of evaporation technology*. Norwich, CT, Estados Unidos de América: William Andrew Publishing, 1986 P. Minton, *Handbook of evaporation technology*. Norwich, CT, Estados Unidos de América: William Andrew Publishing, 1986
- [26] “Operacion Unitarias III proceso de evaporacion”, Slideshare.net. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/JairoEnriqueOrdoezVe1/operacion-unitarias-iii-proceso-de- evaporacion>.
- [27] K. Ermis, I. Kucukrendeci, y M. Karabektas, “Investigation of multiple effect evaporator design”, *Isites.info*. [En línea]. Disponible en: <https://isites.info/PastConferences/ISITES2017/ISITES2017/papers/C3-ISITES2017ID264.pdf>.
- [28] “Mar Muerto: qué es, sus propiedades y sus características”
- [29] J. Escat, “El 'Mar Muerto' es un lago cuya salinidad tan elevada no permite que el cuerpo humano se hunda”, *Billiken*, 13-dic-2021. [En línea]. Disponible en: <https://billiken.lat/interesante/sabes-que-es-el-mar-muerto/>.

- [30] “El Mar Muerto - imagen de la semana - observando la tierra”, Esa.int. [En línea]. Disponible en: <https://earth.esa.int/web/earth-watching/image-of-the-week/content/-/article/the-dead-sea/>.
- [31] NG Lensky, Y. Dvorkin, V. Lyakhovsky, I. Gertman, y I. Gavrieli, “Balances de agua, sal y energía del Mar Muerto: BALANCES DE MASA Y ENERGÍA DEL MAR MUERTO”, *Water Resour. Res.*, vol. 41, núm. 12, 2005.
- [32] J. Wisniak, “The Dead Sea-A live pool of chemicals”, *Res.in*, 2002. [En línea]. Disponible en: <https://nopr.nispr.res.in/bitstream/123456789/22829/1/IJCT%209%281%29%2079-87.pdf>.
- [33] Z. Ben-Avraham, R. Hänel, y H. Villinger, “Heat flow through the Dead Sea rift”, *Mar. Geol.*, vol. 28, núm. 3–4, pp. 253–269, 1978.
- [34] E. de Tutores Deusto Salud, “Las propiedades del Mar Muerto”, *Deusto Salud*, 10-sep-2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.deustosalud.com/blog/terapias-naturales/propiedades-mar-muerto>.
- [35] Merckmillipore.com. [En línea]. Disponible en: https://www.merckmillipore.com/ES/es/product/Durapore-Membrane-Filter-0.45m,MM_NF-HVLP04700.
- [36] N. Weisbrod, Y. Yechieli, S. Shandalov, y N. Lensky, “Sobre la viscosidad de las soluciones hipersalinas naturales y su importancia: las salmueras del Mar Muerto”, *J. Hydrol. (Amst.)*, vol. 532, págs. 46 a 51, 2016.
- [37] Academia.edu. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/40557812/APENDICE_A_PROPIEDADES_DEL_AGUA_TABLA_A_1_Sistema_Internacional_a_101_Kpa_Peso_Específico_Densidad_Viscosidad_Dinámica_Viscosidad_Cinemática.
- [38] “Thermal conductivity of water”, *Thermtest Europe*, 11-feb-2021. [En línea]. Disponible en: <https://thermtest.se/thermal-conductivity-of-water>.
- [39] P. Datt, “Latent heat of vaporization/condensation”, en *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2011, pp. 703–703.
- [40] “STEAM TABLES”, en *A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*, Begellhouse, 2011.
- [41] “Cálculos en Evaporadores”, *Scribd*. [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/444920598/CALCULOS-EN-EVAPORADORES>.
- [42] “Propiedades del agua saturada (líquido-vapor): Tabla de presiones Volumen específico Energía interna Entalpía Entropía m³ / kg kJ / kg kJ / kg K Líquido Vapor Líquido Vapor Líquido Vapor Vapor Líquido Vapor Presión Temp, sat, sat, sat, sat, vaporiz, sat, sat, sat, bar o C vfx 10 3 vguf U ghfh fg hgsfsg”, *Unican.es*. [En línea]. Disponible en: <https://personales.unican.es/reduced/Trasparencias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GADOS/Tablas%20Termo.pdf>.

ANEXO I: DEFINICIÓN DE PARÁMETROS

a_{iw}	Actividad del agua para la alimentación o el permeado
B_m	Coefficiente de transferencia de masa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{Pa}$)
C_p	Calor específico ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)
d_p	Diámetro del poro de la membrana (m)
d_h	Diámetro hidráulico (m)
D_w	Difusividad (m^2/s)
h_f	Coefficiente de transferencia de calor en la alimentación ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
h_p	Coefficiente de transferencia de calor en el permeado ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
h_m	Coefficiente de transferencia de calor en la membrana ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)
J	Flujo de masa que atraviesa la membrana ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)
k_B	Constante de Boltzmann (J/K)
k_g	Conductividad térmica del gas ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
k_m	Conductividad térmica de la membrana ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
k_{mm}	Conductividad térmica del material de la membrana ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)
Kn	Número de Knudsen
L	Longitud del módulo de la membrana (m)
M_w	Peso molecular (kg/mol)
Nu_f	Número de Nusselt para la alimentación
Nu_p	Número de Nusselt para el permeado

P_a	Presión media del gas en el interior de la membrana (Pa)
P_{fm}	Presión de la pared en la zona de alimentación (Pa)
P°_{fm}	Presión de vapor de la pared en la zona de alimentación (Pa)
P_m	Presión promedia en los poros de la membrana (Pa)
P_{pm}	Presión de la pared en la zona del permeado (Pa)
P°_{pm}	Presión de vapor de la pared en la zona del permeado (Pa)
Pr_f	Número de Prandlt en la alimentación
Pr_p	Número de Prandlt en el permeado
P_T	Presión total (Pa)
Q_f	Transferencia de calor en la alimentación (W/m^2)
Q_m	Transferencia de calor en la membrana (W/m^2)
Q_p	Transferencia de calor en el permeado (W/m^2)
R	Constante de los gases ideales ($J/mol \cdot K$)
Re_f	Número de Reynolds en la alimentación
Re_p	Número de Reynolds en el permeado
T_{bf}	Temperatura en la zona de la alimentación (K)
T_{bp}	Temperatura en la zona del permeado (K)
T_{fm}	Temperatura de la pared en la zona de la alimentación (K)
T_{pm}	Temperatura de la pared en la zona del permeado (K)
T_m	Temperatura de la media de la membrana (K)
v	Velocidad del fluido (m/s)
ΔH_v	Calor latente de vaporización (J/kg)
ε	Porosidad
δ	Espesor de la membrana (m)

τ	Tortuosidad
σ_v	Diámetro de la colisión de vapor de agua (m)
ρ	Densidad del fluido (kg/m^3)
μ	Viscosidad del fluido (Pa·s)

