



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO  
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

**SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO**

# **T E S I S**

**EVALUACIÓN TÉRMICA Y ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN  
UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UNA UNIDAD DE DESTILACIÓN  
POR MEMBRANA DESTINADA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA  
CON ALTO CONTENIDO DE SALES**

Que para obtener el grado de

**Maestro en  
Ciencias y Tecnología del Agua**

Presenta

**Rogelio Servando Villalobos Hernández**

Tutor: Dr. Ulises Dehesa Carrasco

Cotutor: Dra. Sofía E. Garrido Hoyos

---

## **Posgrado IMTA**

### **Tesis digitales**

### **Restricciones de Uso**

#### **DERECHOS RESERVADOS ©**

#### **PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de video y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto será sancionado por las autoridades correspondientes.

---

## JURADO ASIGNADO

Presidenta:	Dra. Sofía E. Garrido Hoyos	IMTA
Secretaria:	Dra. Petia Mijaylova Nacheva	IMTA
Vocal 1:	Dr. Ulises Dehesa Carrasco	CONACYT-IMTA
Vocal 2:	Dra. Silvia Gelover Santiago	IMTA
Vocal 3:	Dr. Camilo A. Arancibia Bulnes	IER-UNAM

Lugar donde se realizó la Tesis:

INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA (IMTA) - JIUTEPEC, MORELOS.

---

## AGRADECIMIENTOS

Al Posgrado IMTA por la beca otorgada durante mis estudios de Maestría. Gracias por el apoyo económico brindado para poder asistir y participar en congresos nacionales e internacionales.

Al personal administrativo del Posgrado IMTA por su apoyo y seguimiento desde el inicio y hasta el final de la Maestría. Gracias por cada trámite realizado para concluir este proceso académico.

Al laboratorio de Ingeniería Ambiental del Posgrado IMTA-UNAM por facilitarme un espacio para realizar mis experimentos.

A mis profesores e investigadores del IMTA que me impartieron clase. Gracias por fortalecer y enriquecer mis conocimientos académicos.

A mis tutores por sus conocimientos compartidos para realizar esta Tesis. Gracias por su apoyo y ser parte de mi formación académica.

A mis sinodales por sus comentarios y aportaciones para mejorar enriquecer esta Tesis.

A mi familia por estar conmigo apoyándome en todo momento. Gracias por su amor y cariño. ¡Los amo!

---

## RESUMEN

La destilación por membrana con espacio de aire (DMEA) es un proceso térmico de separación que involucra transferencia de calor y vapor de agua, a través de una membrana porosa e hidrófoba mediante un espacio de aire. En este trabajo se presenta un estudio experimental de una unidad DMEA destinada para la desalinización. Para este estudio, se realizaron pruebas experimentales específicas a fin de evaluar los parámetros térmicos y determinar la producción de permeado como función de la temperatura de alimentación, así como la evaluación de la calidad del agua de alimentación y del permeado. Para estas pruebas se emplearon dos tipos de membranas hidrófobas poliméricas de politetrafluoruro de etileno (PTFE) y fluoruro de polivinileno (PVDF) con un tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ . Se mantuvo constante el flujo de alimentación y enfriamiento en un valor nominal de 4.0 L/min. Las temperaturas de alimentación evaluadas fueron 50, 60, 70 y 80 °C. El espacio de aire dentro de la unidad, fue de aproximadamente 3 mm. Como agua de alimentación se emplearon soluciones salinas sintéticas de NaCl y CaSO<sub>4</sub> con una concentración de 5 g/L y 2 g/L respectivamente, así como una mezcla de ambas sales con una concentración de 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO<sub>4</sub> y agua desionizada como blanco. Los resultados muestran que la producción de permeado presenta una tendencia de tipo exponencial como función de la diferencia de temperatura promedio entre el canal de alimentación y enfriamiento en ambas membranas. Se observó una producción máxima de permeado de 9.23 L/m<sup>2</sup>h a 80°C con las membranas de PTFE. El calor transferido como calor latente de vaporización en la unidad, utilizando membranas de PTFE, osciló en un intervalo de 77.39% como máximo a un valor mínimo de 49.35% dependiendo de las condiciones de operación. Las contribuciones por calor sensible a través de la unidad osciló en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4%, mientras que las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 21.8%. En el caso de las membranas de PVDF, se observó un comportamiento muy similar a las membranas de PTFE, por lo que no fue posible establecer una diferencia significativa en el consumo energético entre ambas membranas. Las membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$  demostraron ser útiles para el proceso de separación de la DMEA, en ambos casos, la calidad del agua de permeado se mantuvo por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000), clasificándose en la categoría de agua destilada o desionizada, lo que posibilita con un tratamiento posterior (remineralización), la potabilización del producto.

---

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Generalidades .....	1
1.2 Antecedentes .....	5
1.3 Problemática.....	8
1.4 Justificación.....	9
1.5 Objetivos .....	10
1.5.1 Objetivo general .....	10
1.5.1 Objetivos específicos.....	10
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	10
2.1 Características fisicoquímicas del agua con alto contenido de sales.....	10
2.2 Parámetros fisicoquímicos directos e indirectos de la salinidad .....	11
2.2.1 Conductividad eléctrica.....	12
2.2.2 Sólidos disueltos totales .....	13
2.2.3 Dureza total .....	13
2.2.4 Alcalinidad total .....	14
2.2.5 Temperatura.....	15
2.2.6 pH.....	16
2.3 Desalinización .....	17
2.3.1 Desalinización a nivel mundial .....	18
2.3.2 Desalinización en México .....	20
2.4 Destilación por membrana (DM).....	21
2.4.1 Descripción general del proceso de la DM.....	21
2.4.2 Configuraciones empleadas en la DM.....	22
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN TEÓRICA.....	26
3.1 Composición de una mezcla.....	26
3.2 Evaporación en la interfase liquido-vapor.....	27
3.3 Descripción del modelo físico.....	29
3.3.1 Difusión ordinaria.....	30
3.3.2 Difusión térmica.....	31
3.3.3 Procesos de transporte combinados.....	31
3.4 Transferencia de calor a través del sistema .....	34
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA.....	39

4.1 Metodología experimental.....	39
4.2 Descripción de la unidad desalinizadora DMEA .....	40
4.3 Descripción de la unidad desalinizadora DMEA .....	41
4.3.1 Placas laterales de Nylon.....	42
4.3.2 Juntas de neopreno y silicón.....	42
4.3.3 Placa condensadora .....	42
4.3.4 Soporte metálico para la membrana .....	42
4.3.5 Membranas hidrófobas de PTFE y PVDF.....	43
4.4 Descripción del sistema desalinizador.....	43
4.4.1 Zona de calentamiento.....	44
4.4.2 Unidad desalinizadora DMEA .....	45
4.4.3 Zona de enfriamiento.....	45
4.5 Instrumentación del sistema desalinizador .....	46
4.5.1 Medición de la temperatura .....	46
4.5.2 Control del flujo .....	47
4.5.3 Sistema de adquisición de datos .....	47
4.5.4 Medición del permeado .....	48
4.6 Preparación de las soluciones salinas sintéticas (agua de alimentación).....	49
4.6.1 Agua salina sintética con NaCl.....	49
4.6.2 Agua salina sintética con CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O .....	49
4.6.3 Agua salina sintética con NaCl + CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O .....	50
4.7 Parámetros de la calidad del agua .....	50
4.8 Parámetros térmicos .....	50
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>52</b>
5.1 Evaluación de la producción de permeado.....	52
5.2 Temperatura de enfriamiento y efectos en la producción de permeado .....	55
5.3 Determinación del consumo energético .....	56
5.4 Evaluación del flujo de sal .....	60
5.5 Evaluación de la calidad del agua .....	62
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>72</b>
Referencias.....	77
Anexo A. Descripción algebraica para la difusión ordinaria.....	80
Anexo B. Descripción algebraica para la difusión térmica .....	83
Anexo C. Tablas de vibraciones y grupos funcionales (IFTR) .....	87

# ÍNDICE DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

Figura 1.1. Clasificación general de las tecnologías empleadas en la desalinización .....	3
Figura 1.2. Localización geográfica de acuíferos contaminados por alta salinidad en México .....	9

## CAPÍTULO 2

Figura 2.1. Variación de las especies iónicas en función del pH y fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad .....	14
Figura 2.2. Ejemplos de solubilidad directa e inversa para dos formas del sulfato de calcio .....	15
Figura 2.3. Escala de pH .....	16
Figura 2.4. Distribución de la capacidad de desalinización a nivel mundial en m <sup>3</sup> /d .....	18
Figura 2.5. Tecnologías de procesos de membrana y sus aplicaciones.....	19
Figura 2.6. Descripción grafica del proceso de la DM.....	21
Figura 2.7. Configuraciones empleadas en la DM.....	22
Figura 2.8. Descripción grafica del proceso de la DMEA.....	24

## CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Curva de saturación de vapor de agua en aire como función de la temperatura. ....	28
Figura 3.2. Esquema conceptual de transferencia de masa y calor al interior de la unidad DMEA.....	30
Figura 3.3. Condiciones de frontera al interior de una unidad DMEA .....	33

## CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Metodología general del trabajo. ....	39
Figura 4.2. Componentes de la unidad DMEA y unidad ensamblada.....	41
Figura 4.3. Membranas Millipore de 0.45 µm de PTFE y PVDF .....	43
Figura 4.4. Diseño experimental del sistema desalinizador. ....	44
Figura 4.5. Proceso de evaporación-condensación en el interior de la unidad desalinizadora DMEA. ....	45
Figura 4.6. Curva de calibración para los termopares utilizados.....	46
Figura 4.7. Curva de referencia para los flujómetros Tipo 1 y Tipo 2.....	47
Figura 4.8. Sistema de adquisición de datos y tarjeta de lectura.....	48
Figura 4.9. Captación de permeado y técnica gravimétrica .....	48

## CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para una membrana de PTFE.....	53
Figura 5.2. Producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para una membrana de PVDF.....	53
Figura 5.3. Producción de permeado como función de la diferencia de temperatura de alimentación en membranas de PTFE y PVDF. ....	54
Figura 5.4. Efecto de la producción de permeado como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para una membrana de PTFE.....	55
Figura 5.5. Efecto de la producción de permeado como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para una membrana de PVDF.....	56



---

Figura 5.6. Flujo de calor latente y sensible asociados con la producción de permeado para una membrana de PTFE.....	57
Figura 5.7. Flujo de calor latente y sensible asociados con la producción de permeado para una membrana de PVDF.....	58
Figura 5.8. Razón de ganancia a la salida (GOR) como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.....	59
Figura 5.9. Consumo específico (EC) como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.....	59
Figura 5.10. Flujo de masa de sal a través de la membrana de PTFE y PVDF.....	61
Figura 5.11. Espectros IFTR de la membrana PTFE de 0.45 $\mu\text{m}$ sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico.....	52
Figura 5.12. Espectros IFTR de la membrana PVDF de 0.45 $\mu\text{m}$ sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico.....	53

# ÍNDICE DE TABLAS

## CAPÍTULO 1

Tabla 1.1. Acuíferos existentes en cada RHA del país y su estado actual .....	2
Tabla 1.2. Acuíferos contaminados en México por alta salinidad.....	8

## CAPÍTULO 2

Tabla 2.1. Principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido de sales	10
Tabla 2.2. Clasificación del agua de acuerdo a la CE y a los SDT .....	11
Tabla 2.3. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza .....	11
Tabla 2.4. Clasificación del agua de acuerdo a su alcalinidad .....	11
Tabla 2.5. Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos entre tecnologías térmicas y de membranas .....	17
Tabla 2.6. Clasificación de los procesos de desalinización por el tipo de separación.....	18

## CAPÍTULO 3

Tabla 3.1. Analogía entre base másica y base molar.....	26
Tabla 3.2. Valores para los coeficientes empíricos de la ecuación de Antonie.....	28

## CAPÍTULO 4

Tabla 4.1. Propiedades físicas y químicas de NaCl y CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O .....	49
Tabla 4.2. Metodología empleada para la determinación de la calidad de agua. ....	50

## CAPÍTULO 5

Tabla 5.1. Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PTFE de 0.45 µm .....	52
Tabla 5.2. Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PVDF de 0.45 µm .....	52
Tabla 5.3. Resultados de evaluar los indicadores RR y PR.....	60
Tabla 5.4. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl .....	61
Tabla 5.5. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 2 g/L de CaSO <sub>4</sub> . ....	62
Tabla 5.6. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación empleando como agua de alimentación 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO <sub>4</sub> . ....	62
Tabla 5.7. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl. ....	63
Tabla 5.8. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 2 g/L de CaSO <sub>4</sub> .....	64
Tabla 5.9. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO <sub>4</sub> .....	64
Tabla 5.10. Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su salinidad .....	66
Tabla 5.11. Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su dureza y alcalinidad total.....	67
Tabla 5.12. Resultados del COT obtenidos a partir de un tratamiento térmico a 80°C por 8 horas continuas. ....	68
Tabla 5.13. Especificaciones para agua grado reactivo.....	68

---

## ABREVIATURAS

APHA	Asociación Americana de Salud Pública (por sus siglas en inglés)
ASTM	Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés)
Ca <sup>2+</sup>	Ion calcio (catión)
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
CaSO <sub>4</sub>	Sulfato de calcio
CE	Conductividad eléctrica
Cl <sup>-</sup>	Ion cloruro (anión)
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CONAPO	Consejo Nacional de Población
COT	Carbono orgánico total
DM	Destilación por membrana
DMEA	Destilación por membrana con espacio de aire
DMCD	Destilación por membrana por contacto directo
DMGB	Destilación por membrana con gas de barrido
DMAV	Destilación por membrana con aplicación de vacío
ED	Electrodialisis
EC	consumo de energía específico (por sus siglas en inglés)
GOR	Razón de ganancia a la salida (por sus siglas en inglés)
IDA	Asociación Internacional de Desalinización (por sus siglas en inglés)
IFTR	Espectro Infrarrojo por Transformadas de Fourier
LAN	Ley de Aguas Nacionales

---

LMP	Límite máximo permisible
Na <sup>+</sup>	Ion sodio (catión)
NaCl	Cloruro de sodio
NF	Nanofiltración
OI	Ósmosis Inversa
pH	Logaritmo negativo de la actividad iónica del ion hidronio
PR	Cociente de desempeño (por sus siglas en inglés)
PTFE	Politetrafloruro de etileno (teflón)
PVDF	Floruro de polivinileno
RHA	Región hidrológica administrativa
RR	Razón de recuperación (por sus siglas en inglés)
SDT	Sólidos disueltos totales
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ion sulfato (anión)
T	Temperatura

## NOMENCLATURA

$h$	Coefficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)
$\dot{N}_A$	Flujo molar (mol/m <sup>2</sup> s)
$\dot{N}$	Flujo másico (kg/m <sup>2</sup> s)
$\Delta H_v$	Entalpia de vaporización del agua (J/kg)
$k$	Conductividad térmica del agua (W/mK)
$c_p$	Calor específico (J/kgK)
$T$	Temperatura (°C)
$l$	Espesor (m)
Re	Numero de Reynolds (adimensional)
Pr	Numero de Prandtl (adimensional)
$D_{AB}$	Coefficiente de difusión de la mezcla (m <sup>2</sup> /s)
$C, c$	Concentración molar total (mol/m <sup>3</sup> )
$x_i$	Fracción molar (adimensional)
$K_T$	Coefficiente de difusión térmica (adimensional)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\mu$	Viscosidad (kg/ms)
$\Gamma$	Flujo total del condensado (kg/ms)
$\dot{m}$	Caudal másico (L/min)
$M$	Masa molar del agua
$T_0$	Temperatura de referencia (°C)
$Q$	Transferencia de calor a través del sistema (W)
$c_A$	Concentración molar parcial
$Q_l$	Perdidas de calor (W)
$Q_A$	Flujo de calor en el canal de alimentación (W)
$Q_E$	Calor recuperado en el canal de enfriamiento (W)
$Q_{dis}$	Calor latente (W)
$Q_{sen}$	Calor sensible (W)

---

$R$	Constante universal de los gases
$p_A$	Presión parcial (Pascal)

## Subíndices

$m$	membrana
$ea$	Espacio de aire
$p$	Placa de aluminio
$f$	Fluido
$L$	Líquido
$A$	Vapor de agua
$B$	Aire

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen aspectos relevantes sobre la pertinencia de esta tesis. Como introducción al tema, se presenta un panorama general sobre la escasez de agua potable que existe en México y, de los efectos del incremento de la población sobre la presión a los mantos acuíferos a corto plazo. Se realiza una descripción general sobre la problemática actual de la contaminación de acuíferos por alta salinidad en la parte noroeste del país. Se describe el estado de arte de la destilación por membrana, y su respectiva configuración con espacio de aire, como un tratamiento alternativo para la desalinización. Para finalizar este capítulo, se presenta la justificación y los objetivos de esta tesis.

## 1.1 Generalidades

El desabasto de agua potable se está convirtiendo en un problema cada vez con mayor importancia en muchos lugares del mundo, incluyendo México. Este fenómeno se ve acentuado en las zonas áridas donde el agua potable es escasa y el desarrollo local depende en gran medida de la disponibilidad del recurso hídrico. Un aspecto importante a considerar en los escenarios futuros es el incremento de la población y su concentración en zonas urbanas. Según la CONAGUA (2015), el incremento de la población ocasionará la disminución del agua renovable<sup>1</sup> per cápita a nivel nacional, decreciendo de 3 736 m<sup>3</sup>/hab/año en 2014 a 3 253 m<sup>3</sup>/hab/año para el 2030. De acuerdo con las proyecciones de la CONAPO (2015), entre 2014 y 2030 la población del país se incrementará en 17.8 millones de personas. Además, se estima que para el 2030 aproximadamente el 78.3% de la población total se asentará en localidades urbanas<sup>2</sup>, provocando con ello, escasez y aumento de la demanda de este recurso hídrico.

En México, el 38.7% del volumen total concesionado para usos consuntivos<sup>3</sup> procede del agua subterránea, siendo este recurso hídrico la principal fuente de abastecimiento de agua potable en el

---

<sup>1</sup>Agua renovable: cantidad de agua máxima que es factible explotar anualmente en una región, es decir, la cantidad de agua que es renovada por la lluvia y el agua proveniente de otras regiones o países (importaciones). Se calcula como el escurrimiento natural medio superficial interno anual, más la recarga total anual de los acuíferos, más los flujos de entrada menos los flujos de salida de agua a otras regiones (Gleick, 2002).

<sup>2</sup>Se considera que la población urbana es aquella que integra localidades mayores o iguales a 2 500 habitantes, en tanto que la rural se refiere a poblaciones menores de 2 500 habitantes (CONAPO, 2015).

<sup>3</sup>Usos consuntivos: se define como la diferencia entre el volumen extraído y el descargado al llevar a cabo una actividad. Entre estos usos se encuentran el agrícola (76.7%), el abastecimiento público urbano (14.2%), la industria autoabastecida (4.2%) y la energía eléctrica excluyendo las hidroeléctricas (4.9%)

país. Sin embargo, la calidad del agua de esta fuente se ha visto afectada por la contaminación, ya sea de origen natural o antropogénico (CONAGUA, 2015). Dentro de las causas naturales se encuentra la contaminación de mantos acuíferos por alta salinidad, debido principalmente a la geología y morfología del subsuelo. Ejemplo de ello, son los acuíferos que presentan contaminación por aguas subterráneas salobres, los cuales se ubican principalmente en el centro y norte del país. Estos acuíferos forman parte de la región hidrológica-administrativa (RHA) número VII (cuencas centrales del norte). Esta región se caracteriza por la presencia de aguas congénitas y minerales de fácil disolución, así como condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y de evaporación de aguas superficiales (CONAGUA, 2015).

Por otro lado, el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas costeras se debe a una causa antropogénica, denominada intrusión marina<sup>4</sup>. Este fenómeno se presenta mayormente en los acuíferos cercanos a mares y océanos. Estos acuíferos costeros contaminados por dicho fenómeno se encuentran ubicados principalmente en la península de Baja California y en la región noroeste del país, los cuales pertenecen a las RHA I y II, respectivamente. En la Tabla 1.1 se presenta un listado general de los acuíferos existentes en cada RHA del país y su estado actual.

Tabla 1.1. Acuíferos existentes en cada RHA del país y su estado actual (CONAGUA, 2015).

RHA	Número de acuíferos				Recarga media (hm <sup>3</sup> )
	Total	Sobreexplotado	Con intrusión marina	Salinización de suelos y aguas subterráneas salobres	
I	88	15	10	4	1 658
II	62	10	15	---	3 207
III	24	2	---	---	3 076
IV	45	1	---	---	5 351
V	36	---	---	---	1 936
VI	102	18	---	8	5 900
VII	65	23	---	18	2 320
VIII	128	32	---	---	9 670
IX	40	1	---	---	4 069
X	22	---	---	---	4 705
XI	23	---	---	---	22 718
XII	4	---	---	1	25 316
XIII	14	4	---	---	2 346
<b>TOTAL</b>	<b>653</b>	<b>106</b>	<b>15</b>	<b>31</b>	<b>92 271</b>

<sup>4</sup>Intrusión marina: fenómeno que se origina al invertirse el gradiente hidráulico debido a la explotación intensiva del agua subterránea, a través del bombeo, provocando el descenso de la superficie piezométrica y alterando la posición de equilibrio natural de la interfase marina; provocando así, el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas, con la consiguiente, la contaminación del acuífero costero (LAN).



La desalinización es un proceso que permite obtener agua potable a partir de agua con alta salinidad. Para llevar a cabo este proceso existen diversas tecnologías las cuales se diferencian por costos, impacto ambiental, calidad del producto, energía consumida, entre otras más. Sin embargo, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua salobre o marina, al grado de producir agua destilada o desionizada. De acuerdo con Shatat y Riffat (2012), las tecnologías actuales para la desalinización se pueden clasificar en procesos principales y procesos alternativos. Dentro de los procesos principales, se encuentran los procesos térmicos y de membranas. En la Figura 1.1 se muestra una clasificación general de las tecnologías actuales empleadas en la desalinización propuesta por Shatat y Riffat (2012). Una descripción más detallada de estas tecnologías, se puede encontrar en Dévora-Isiordia (2013) y Dehesa-Carrasco (2013).

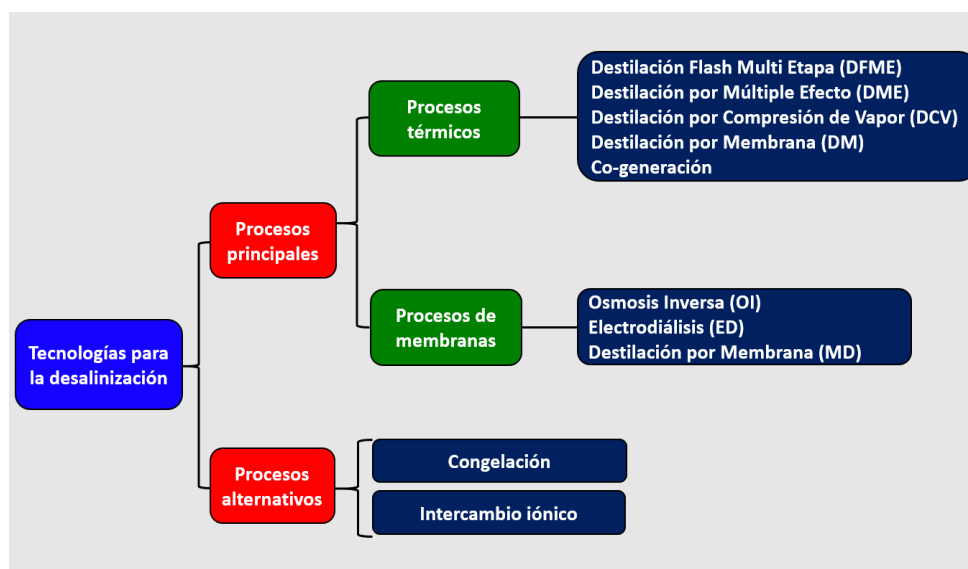


Figura 1.1. Clasificación general de las tecnologías empleadas en la desalinización (Shatat y Riffat, 2012).

Dentro de las tecnologías principales para llevar a cabo la desalinización, se encuentra la destilación por membrana (DM). La DM es una tecnología de separación derivada de la combinación de un proceso térmico de baja entalpia y un proceso por membrana, la cual a su vez, puede ser asistida con energía solar térmica y/o eléctrica. Dada estas características, la DM presenta ciertas ventajas competitivas respecto a los otros sistemas de desalinización. Por ejemplo: permite tratar soluciones salinas altamente concentradas a diferencia de los sistemas convencionales de destilación (Alkhudhiri *et al.*, 2012a); puede operar con colectores solares planos, permitiendo su aplicación

en lugares remotos o alejados del suministro eléctrico, donde el recurso solar es abundante (Walton *et al.*, 2004); se estiman costos menores por unidad de volumen producido al compararlo con sistemas de Ósmosis Inversa (OI), esto porque la DM opera a presiones relativamente bajas (1 atmósfera) (Tiwari *et al.*, 2003).

Como cualquier tecnología emergente, la DM también tiene una serie de desventajas respecto a los otros sistemas de desalinización. Principalmente, se le considera como una tecnología “no madura”, por lo tanto, existe una serie de factores de diseño que hasta la fecha no han sido resueltos. Por ejemplo: no existen membranas especializadas para el proceso, las membranas que se utilizan son de microfiltración (Guillen-Burrieza *et al.*, 2014); la producción de permeado puede ser afectada seriamente si no se tiene un drenado eficiente (El-Bourawi *et al.*, 2006); entre otras más. Sin embargo, a nivel laboratorio se ha demostrado que los sistemas DM, pueden ser empleados para tratar aguas contaminadas con alta salinidad (Alkudhiri *et al.*, 2012b y 2013a) y/o con presencia elevada de arsénico (Manna *et al.*, 2010) sin afectar de manera significativa la calidad de permeado. Este permeado, a su vez, con un tratamiento posterior (remineralización) puede emplearse como agua para consumo humano.

Hoy en día existen cuatro configuraciones empleadas en la DM, las cuales se nombran dependiendo de cómo se recupere el vapor de agua en la zona enfriamiento. Estas configuraciones son: por contacto directo (DMCD), con gas de barrido (DMGB), con aplicación de vacío (DMAV) y con espacio de aire (DMEA). En los cuatro casos, el producto resultante es agua desionizada (Dehesa-Carrasco, 2013). De las cuatro configuraciones existentes, la DMEA presenta ventajas significativas respecto a las otras tres configuraciones empleadas en la DM. Por ejemplo, el espacio de aire reduce las pérdidas de calor por conducción a través de la membrana, lo cual disminuye el consumo de energía por unidad de volumen en comparación con la configuración DMCD. Asimismo, no es necesario refrigerar el sistema con agua de mayor calidad o similar a la del permeado obtenido, esto se puede realizar utilizando simplemente agua de grifo o agua de menor calidad a la del permeado que deseamos obtener. Otra ventaja de la configuración DMEA, radica en la forma de cómo se recupera el permeado en la zona de enfriamiento, la cual se da por gravedad. Esto implica ciertas ventajas respecto a las configuraciones DMAV y DMGB debido a que no se requiere de equipos auxiliares para trasladar y recuperar el vapor de agua, como una bomba de

vacío o un condensador, lo que implica un consumo de energía menor para la obtención del permeado o condensado.

A diferencia de los procesos de destilación convencionales, la evaporación en el proceso de la DMEA ocurre a temperaturas por debajo del punto de ebullición y en un espacio reducido próximo a los 5 mm de espesor, lo que posibilita construir sistemas compactos alimentados con calor de baja entalpía. Esta tecnología funciona a presiones bajas y soporta corrientes de alimentación de alta salinidad; asimismo, puede operar con fuentes de calor residual provenientes de algún proceso industrial térmico (calderas, intercambiadores de calor, etc.) o combinarse con energías renovables, como la geotérmica o la solar térmica. Estas características ofrecen ventajas prometedoras para la desalinización y posibilitan el uso de esta tecnología para el tratamiento de aguas con alto contenido de sales.

## 1.2 Antecedentes

### Destilación por membrana

El proceso de la DM fue patentado en 1963 y el primer artículo publicado apareció en 1967. Sin embargo, el interés en esta tecnología se desvaneció rápidamente debido en parte, a la baja producción de permeado en comparación con los sistemas de OI. Posteriormente, a principios de 1980, el proceso de la DM recuperó interés debido a la capacidad que tienen para utilizar los residuos de calor de bajo entalpía y/o combinarse con fuentes alternativas de energía, como la geotérmica y la solar térmica (El-Bourawi *et al.*, 2006). Razón por lo cual, el interés en esta tecnología se ha venido desarrollando y ha sido objeto de estudio por diversos grupos de trabajo alrededor del mundo (Banat *et al.*, 1994; Izquierdo-Gil *et al.*, 1999; Alkudhiri *et al.*, 2012 y 2013; Guillen-Burrieza *et al.*, 2011 y 2014; Dehesa-Carrasco *et al.*, 2013; Warsinger *et al.*, 2015). Asimismo, con el desarrollo de las tecnologías de membranas y el mejoramiento de las características de los módulos, la DM se ha convertido en una alternativa viable para la desalinización (Blanco *et al.*, 2009). Sin embargo, este proceso solo se ha realizado a escala laboratorio y puesto en marcha en prototipos de unidades experimentales, es decir, el proceso de la DM aún no ha sido implementado a escala industrial. Las limitantes incluyen: el bajo flujo de permeado en comparación con otras tecnologías de separación como la OI; el decaimiento del flujo

de permeado debido a la concentración y los efectos de polarización de temperatura; el ensuciamiento y humectación total o parcial de los poros de la membrana y, por último, a los costos energéticos y económicos inciertos (El-Bourawi *et al.*, 2006).

### Destilación por membrana con espacio de aire

En general, la mayoría de publicaciones sobre la DMEA se centran en el estudio de las variables y parámetros (directos e indirectos) que afectan la producción de permeado. Dentro de estas variables directas se encuentra: la temperatura y el flujo de alimentación, la concentración salina, el flujo másico, la velocidad de mezclado, la temperatura de enfriamiento y el espacio de aire dentro de la unidad. Dentro de los parámetros indirectos, se encuentran los relacionados a las propiedades intrínsecas de la membrana, como son: espesor, porosidad, tortuosidad y composición.

Diversos estudios teóricos y experimentales han demostrado la viabilidad del proceso de separación mediante la DMEA. Por ejemplo, Dehesa-Carrasco *et al.* (2013) establecen que la temperatura del lado caliente tiene un efecto de tipo exponencial sobre el aumento del volumen del permeado. Izquierdo-Gil *et al.* (1999) mencionan que la velocidad en el caudal de alimentación provoca un aumento del volumen del permeado, porque al aumentar el número de Reynolds (Re) se minimiza la resistencia de la capa límite y el coeficiente de transferencia de calor se incrementa. Nejati *et al.* (2015) estimaron que un aumento en la concentración de sal produce una sutil caída en el flujo de permeado. Shirazi y Kargari (2014) observaron una relación lineal entre el espesor de aire y el flujo de permeado.

Entre las diversas aplicaciones que tiene la DMEA destaca: la producción de agua potable a partir de aguas con alto contenido de sales (Alkhudhiri *et al.*, 2013b), el tratamiento de aguas con arsénico (Manna *et al.*, 2010) y el tratamiento de aguas con alta dureza provenientes de manantiales geotérmicos (Bouguecha y Dhahbi, 2002). La mayoría de los trabajos realizados sobre DMEA, emplean membranas poliméricas hidrófobas de politetrafluoruro de etileno (PTFE) con un rango de tamaño de poro de 0.2 hasta 1  $\mu\text{m}$  (Alkhudhiri *et al.*, 2012 y 2013). Esto porque tienen una tolerancia mayor a la temperatura altas (Guillen-Burrieza *et al.*, 2014). Sin embargo, este tipo de membranas resultan ser aproximadamente 50% más costosas en comparación con las membranas de fluoruro de polivinileno (PVDF). Banat *et al.* (1998), realizaron un estudio comparativo con dos

tipos de membranas. En este trabajo se utilizaron membranas de PTFE de 0.5  $\mu\text{m}$  y membranas de PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ , empleando como agua de alimentación una solución sintética de NaCl. Las pruebas desarrolladas tuvieron una duración de una semana en operación continua.

Alkudhiri *et al.* (2012b y 2013b) realizaron pruebas experimentales a nivel laboratorio, para tratar soluciones con alta salinidad. Para ello, utilizaron una unidad DMEA con dimensiones de 14.5 x 9.9 x 5.5 cm y con un espacio de aire de 8 mm, empleando membranas de PTFE con un tamaño de poro de 0.2, 0.45 y 1  $\mu\text{m}$ . El rango de temperatura de alimentación fue de 40 a 80°C con incrementos de 10°C y una temperatura de enfriamiento controlada de 5 a 25°C con incrementos de 5 °C. El flujo de alimentación en el canal de alta fue variable, en un rango de 0.5 a 2.0 L/min con incrementos de 0.5 L/min. Como agua de alimentación, se emplearon soluciones salinas sintéticas de NaCl, MgCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La concentración máxima utilizada de cada una de las sales empleadas fue de 180, 95.2, 10.6 y 142 g/L, respectivamente. Los trabajos se realizaron en un periodo de 5 horas, a partir del estado estacionario, obteniendo un flujo máximo de permeado de 1.6, 1.8 y 2.3 g/m<sup>2</sup>s. Estos autores llegaron a la conclusión de que la producción de permeado está en función del tamaño de poro de la membrana, del flujo y de la temperatura de alimentación. Asimismo, concluyen que la producción de permeado disminuye en función de la temperatura de enfriamiento y la concentración de sal, decreciendo alrededor del 6% conforme aumenta la temperatura de enfriamiento de 5 a 25°C con incrementos de 5 °C y un rango de concentración salina de 5.8 a 180 g/L de NaCl.

Dehesa *et al.* (2013), desarrollaron un prototipo experimental de una unidad DMEA con una configuración de placas paralelas y membrana planas que permite la recuperación de calor de cambio de fase, a fin de incorporar la energía térmica nuevamente al proceso. En la publicación de resultados, se enfatiza que la producción de permeado está intrínsecamente ligada a las temperaturas internas y que los efectos de capa límite son importantes. Para el estudio, se emplearon membranas de PTFE de 0.22  $\mu\text{m}$  en una unidad DMEA con dimensiones de 30 x 20 x 6.7 cm y, con una área efectiva de membrana de 144 cm<sup>2</sup>. Con base en la publicación, se establece una producción nominal de 8 a 12 L/m<sup>2</sup>h. En este trabajo, se utilizó una solución salina sintética de 30 g/L de NaCl como agua de alimentación.

### 1.3 Problemática

Según la CONAGUA (2015), México cuenta con 653 acuíferos de los cuales 183 son costeros, presentando 15 de ellos contaminación por intrusión marina. Dichos acuíferos, se encuentran localizados principalmente en las RHA I y II, las cuales comprenden la península de Baja California (Norte y Sur) y la región noroeste del país (Sonora). Además de la contaminación de acuíferos por intrusión marina, existe otro tipo de contaminación por alta salinidad que se debe principalmente, a la geología y morfología del subsuelo (agua subterránea salobre). Estos acuíferos contaminados y sobreexplotados se encuentran distribuidos en la RHA-VII (cuencas centrales del norte) entre los estados de Durango, Zacatecas y San Luis Potosí.

El agua extraída de estos acuíferos contaminados por altas concentraciones de sales, no es apta para los diferentes usos reconocidos en la Ley de Aguas Nacionales (LAN), tales como uso agrícola, uso público urbano, uso industrial y uso doméstico. Estas restricciones, se encuentran asociadas a la elevada concentración de sales (iones) disueltos presentes en el agua salobre y marina. Esos iones disueltos en elevadas concentraciones, pueden llegar a provocar suelos salinos en la agricultura, incrustaciones en tuberías tanto domésticas como industriales y problemas de salud asociados al consumo elevado de estas sales. En la Tabla 1.2 se presenta un listado de los acuíferos contaminados por alta salinidad y, su distribución geográfica en el país (Figura 1.2).

Tabla 1.2. Acuíferos contaminados en México por alta salinidad (CONAGUA, 2015).

Clave	Acuífero	Clave	Acuífero	Clave	Acuífero
209	Laguna Salada	506	El Hundido	2403	Salinas de Hidalgo
210	Valle de Mexicali	508	Paredón	2603	Sonoyta-Puerto Peñasco
211	Ensenada	509	La Paila	2605	Caborca
212	Maneadero	520	Laguna del Rey-Sierra Mojada	2619	Costa de Hermosillo
219	Camalú	523	Principal-Región Lagunera	2635	Valle de Guaymas
220	Colonia Vicente Guerrero	524	Acatita	2636	San José de Guaymas
221	San Quintín	525	Las Delicias	2801	Bajo Río Bravo
246	San Simón	833	Vale de Juárez	3218	Cedros
306	Santo Domingo	848	Lagua de Palomas	3219	El Salvador
323	Los Planes	1021	Pedriceña-Velardeña	3220	Guadalupe garzón
324	La Paz	1023	Ceballos	3221	Camacho
332	Mulegé	1024	Oriente Aguanaval	3222	El Cardito
405	Xpujil	1026	Vicente Suarez	3223	Guadalupe de las Corrientes
502	Cañón del Derramadero	1916	Navidad-Potosí-Raíces	3226	Chupaderos
504	Cuatrociénegas-Ocampo	2402	El Barril		

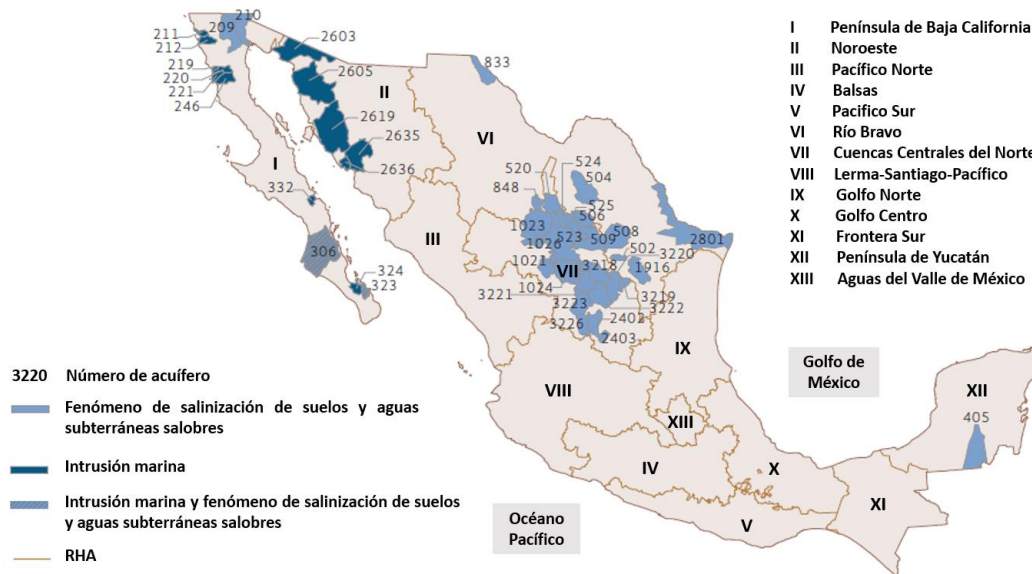


Figura 1.2. Localización geográfica de acuíferos contaminados por alta salinidad en México (CONAGUA, 2015).

## 1.4 Justificación

Con el fin de hacerle frente al desabasto de agua potable en los próximos años, en México, se están buscando fuentes alternativas para el tratamiento de aguas que provienen de mantos acuíferos contaminados por alta salinidad, tal es el caso de los acuíferos contaminados por agua subterránea salobre y/o por intrusión marina, los cuales están ubicados principalmente en la parte noroeste del país. Los sistemas de desalinización asistidos con energía solar, son una alternativa para aumentar la disponibilidad hídrica de buena calidad. Dentro de estas tecnologías se encuentra la DMEA, la cual ofrece ventajas prometedoras para este propósito. Sin embargo, es necesario realizar estudios más detallados con el fin desarrollar sistemas que eventualmente pudieran abordar esta problemática en particular.

Derivado de la revisión bibliográfica se establece lo siguiente:

- No se encontraron estudios de calidad del agua detallados, únicamente medidas indirectas de la salinidad como la conductividad eléctrica (CE). Por lo tanto, deben ser realizados estudios de calidad del agua.
- Menos del 1% de los trabajos reportados utilizan membranas de PVDF. Banat *et al.* (1998) realizan un estudio comparativo de membranas de PVDF y PTFE empleando una solución

sintética de NaCl. Sin embargo, es necesario cuantificar el consumo energético entre ambas membranas y establecer si la diferencia es significativa.

- No se reportan estudios de sales diferentes al NaCl empleando membranas de PVDF. Compuestos como  $\text{CaSO}_4$  a menudo están presentes en mantos acuíferos de agua salobre. Estudiar los efectos sobre la producción de permeado, la calidad del agua y el rendimiento del sistema ayudará a establecer las bases para el desarrollo de nuevas unidades de DMEA.

Con base en lo anterior y, con el fin de abordar esta problemática los objetivos de esta tesis son los siguientes:

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es evaluar los parámetros térmicos en la producción de permeado en una unidad experimental DMEA a diferentes temperaturas de alimentación; así como realizar el estudio de la calidad del agua de alimentación y del permeado, empleando membranas hidrófobas de PVDF y PTFE con un tamaño de poro de  $0.45 \mu\text{m}$ .

### 1.5.1 Objetivos específicos

- Evaluar un prototipo experimental de una unidad DMEA destinada para la desalinización, empleado membranas hidrófobas de PVDF y PTFE de  $0.45 \mu\text{m}$ .
- Determinar la producción de permeado en función de la temperatura de alimentación ( $50$ ,  $60$ ,  $70$  y  $80^\circ\text{C}$ ), manteniendo constante el flujo de alimentación y el espacio de aire dentro de la unidad DMEA.
- Analizar la calidad del agua de alimentación (solución salina sintética) y del permeado a través de análisis fisicoquímicos (CE, SDT, pH, alcalinidad, dureza total, aniones y cationes, etc.)
- Determinar el consumo energético en el proceso de desalinización y expresar estos resultados por medio de los parámetros térmicos (GOR, RR, EC y PR).
- Determinar el consumo de energía específica al emplear dos tipos de membranas PVDF y PTFE de  $0.45 \mu\text{m}$ .



## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En este capítulo se describen las características fisicoquímicas del agua con alto contenido de sales, así como los parámetros fisicoquímicos directos e indirectos para evaluarla. En las secciones siguientes de este capítulo, se aborda el tema de la desalinización a nivel mundial y local como una solución a la demanda de agua potable y como una alternativa de tratamiento de acuíferos contaminados por alta salinidad. Por último, se realiza una clasificación general de las tecnologías empleadas para llevar a cabo el proceso de la desalinización. Dentro de estas tecnologías se encuentra la DM y, su respectiva configuración con espacio de aire (DMEA).

### 2.1 Características fisicoquímicas del agua con alto contenido de sales

El agua con alto contenido de sales se caracteriza por la presencia de sales minerales denominadas iones. Por su presencia, estos iones se pueden clasificar en iones mayores o menores; por su carga, en aniones (-) y cationes (+); y por su estado de oxidación o valencia, en monovalentes (una valencia) y divalentes (dos valencias). Estos iones disueltos en el agua pueden provocar un incremento en el valor de la conductividad eléctrica (CE), así como un aumento en la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), de la dureza y de la alcalinidad total. Estos cuatro parámetros fisicoquímicos están relacionados directamente con la temperatura y el pH del agua. Una variación en la temperatura afecta el movimiento iónico, lo que provoca un incremento de la CE de aproximadamente 12% por cada grado Celsius (°C). Por otra parte, el pH puede alterar la concentración de las especies de carbono inorgánico, provocando cambios en la concentración de la dureza y la alcalinidad. Si cualquiera de estos dos factores cambia, también cambiarían las propiedades del agua, modificando la solubilidad de los iones presentes. En a Tabla 2.1 se muestran los principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido en sales.

Tabla 2.1. Principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido de sales.

Iones mayoritarios		Iones minoritarios	
Cationes	Aniones	Cationes	Aniones
Sodio (Na <sup>+</sup> )	Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	Estroncio (Sr <sup>2+</sup> )	Bromuro (Br <sup>-</sup> )
Potasio (K <sup>+</sup> )	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Fluoruro (F <sup>-</sup> )
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	Bario (Ba <sup>2+</sup> )	Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) y Nitritos (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Boro (B)	Silicatos (SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )
	Hidróxidos (OH <sup>-</sup> )		Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )

La salinidad del agua está en función del tipo y de la cantidad de sales que contenga. Por su salinidad, el agua con alto contenido de sales se puede clasificar en agua potable, salobre, marina o salmueras. Por una parte, la salinidad del agua salobre estará en función de la geología del subsuelo (carbonatos, sulfatos, silicatos, etc.), mientras que la salinidad del agua marina está dada, en su mayoría, por cloruro de sodio (NaCl) disociado en el catión sodio (Na<sup>+</sup>) y el anión cloruro (Cl<sup>-</sup>). Las Tablas 2.2 a 2.4 muestran la clasificación general del agua con alto contenido de sales con base a su valor de CE y a la concentración de SDT, dureza y alcalinidad total.

Tabla 2.2. Clasificación del agua de acuerdo a la CE y a los SDT (APHA, 1995a).

Clasificación	SDT (mg/L)	CE (μS/cm)
Agua potable	0 – 1 000	100 – 2 000
Agua salobre	1 000 – 10 000	2 000 – 5 000
Agua marina	10 000 – 100 000	5 000 – 45 000
Salmuera	>100 000	45 000 – 100 000

Tabla 2.3. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza (Kiely, 1999).

Clasificación	Dureza Total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )
Blandas	0 – 75
Moderadamente dura	75 – 150
Dura	150 – 300
Muy dura	> 300

Tabla 2.4. Clasificación del agua de acuerdo a su alcalinidad (Kemmer, 1989)

Clasificación	Alcalinidad Total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )
Baja	< 75
Media	75 – 150
Alta	> 150

## 2.2 Parámetros fisicoquímicos directos e indirectos de la salinidad

La CE como los SDT son dos parámetros fisicoquímicos que están relacionados entre sí, ya que un valor de CE es directamente proporcional a la concentración de SDT, es decir, a mayor CE mayor SDT. Estos dos parámetros son denominados “medidas indirectas de la salinidad”, debido a que por un lado, pueden cuantificar la concentración total de sales en una solución, sin embargo, no pueden indicar qué tipo de sal o sales están presentes en ella. Ambos parámetros a su vez, se pueden determinar cuantitativamente por métodos establecidos para la determinación del valor de la CE

(NMX-AA-093-SCFI-2000) y la concentración de los SDT (NMX-AA-034-SCFI-2001), o bien, a través de un instrumento de medición, en este caso un conductímetro.

Los parámetros fisicoquímicos directos además de cuantificar la concentración total pueden predecir las especies iónicas presentes en la solución. Entre los parámetros fisicoquímicos directos se encuentra la dureza total, que se debe principalmente a la presencia de los cationes divalentes de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) (NMX-AA-072-SCFI-2001). La alcalinizada total, que se debe principalmente a los carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (NMX-AA-036-SCFI-2001). Los sulfatos y los cloruros, que se deben a la presencia del anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) (NMX-AA-074-SCFI-2010) y del catión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) (NMX-AA-073-SCFI-2001), respectivamente. Además de estos cuatro parámetros fisicoquímicos, existe otro método instrumental cualitativo y cuantitativo más específico para la determinación de la concentración de iones en una solución en su estado natural (metales). Este método químico-analítico es denominado espectroscopia de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001).

### 2.2.1 Conductividad eléctrica

La CE es la capacidad de una disolución para transportar una corriente eléctrica. Depende de la concentración total de iones disueltos en el agua, de su movilidad y valencia, así como de la temperatura. La CE es una medida del grado de mineralización de una solución, obedece la fórmula general de la Ley de Ohms, es inversamente proporcional a la resistencia eléctrica<sup>5</sup> y comúnmente es reportada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (NMX-AA-093-SCFI-2000). En la ecuación 2.1 se muestra la Ley de Ohms simplificada, la cual es necesaria para determinar teóricamente la CE.

$$\mathbf{V = R * I} \tag{2.1}$$

Donde:

**V** = Diferencia de potencia en voltios (V)

**R** = Resistencia eléctrica en ohmios ( $\Omega$ )

**I** = Intensidad de corriente en amperios (A)

---

<sup>5</sup>La resistencia eléctrica es la propiedad que tiene una sustancia de oponerse al paso de una corriente eléctrica originada por una diferencia de potencial, se expresa en Ohm ( $\Omega$ ). La resistencia de un conductor es inversamente proporcional a su área de sección transversal y directamente proporcional a su longitud (NMX-AA-093-SCFI-2000).

## 2.2.2 Sólidos disueltos totales

Los SDT son sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua, las cuales no pueden ser retenidas en el material filtrante. Los SDT son la diferencia entre los sólidos totales (ST) menos los sólidos suspendidos totales (SST) y son reportados usualmente en mg/L (NMX-AA-034-SCFI-2001). En la ecuación 2.2 se muestra la fórmula general para la determinación de los SDT.

$$\text{SDT} = \text{ST} - \text{SST} \quad (2.2)$$

Donde:

**SDT** = Sólidos Disueltos Totales en mg/L

**ST** = Sólidos Totales en mg/L

**SST** = Sólidos Suspendidos Totales en mg/L

## 2.2.3 Dureza total

La dureza total (DT) es definida como la concentración de todos los cationes divalentes metálicos no alcalinos (calcio, magnesio, estroncio, bario y radio) presentes en forma de carbonatos o bicarbonatos en una solución. La DT puede clasificarse en dureza temporal (carbonatada)<sup>6</sup> y dureza permanente (no carbonatada)<sup>7</sup>. A la DT se le atribuye la formación de incrustaciones en recipientes, equipos y tuberías domésticas e industriales, así como la precipitación de jabones y detergentes en contacto con el agua, alterando con ello la formación de espuma. El método para la determinación de la DT se basa en la formación de complejos estables al reaccionar la sal disódica del ácido etilendiamino-tetraacético (EDTA) principalmente con los cationes divalentes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (NMX-AA-072-SCFI-2001). En la ecuación 2.3 se muestra la fórmula general para determinación de la DT.

$$\text{DT} = \text{DCa}^{+2} + \text{DMg}^{+2} \quad (2.3)$$

Donde:

**DT** = Dureza Total en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$

**DCa<sup>+2</sup>** = Dureza de Calcio en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$

**DMg<sup>+2</sup>** = Dureza de Magnesio en mg de  $\text{CaCO}_3/\text{L}$

<sup>6</sup>La dureza temporal o carbonatada se debe a los bicarbonatos y carbonatos principalmente de calcio y magnesio. Se caracteriza por que su ablandamiento se logra con la ebullición del agua (Rodríguez, 2010).

<sup>7</sup>La dureza permanente o no carbonatada es causada por los cationes de calcio y magnesio en combinación con los aniones de sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). La dureza permanente no puede ser eliminada al hervir el agua. Puede ser eliminada utilizando el método con sulfato de sodio (Rodríguez, 2010).

## 2.2.4 Alcalinidad total

La alcalinidad total (AT) es la capacidad de una solución para neutralizar ácidos o aceptar protones, representa la sumatoria de las bases titulables y es inversamente proporcional a la acidez total<sup>8</sup>. La AT puede ser determinada empleando dos indicadores: fenolftaleína y anaranjado de metilo. Ambas formas se determinan por titulación con un ácido fuerte (sulfúrico o clorhídrico), o bien, se puede detectar por el método potenciométrico (NMX-AA-036-SCFI-2001). Dado que la AT de las aguas superficiales y subterráneas se debe por el contenido principalmente de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas, los cuales a su vez se hidrolizan en el agua generando como producto de la hidrólisis el ión hidroxilo (OH<sup>-</sup>). Sin embargo, pueden estar presentes algunas otras sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos que en menor proporción pueden contribuir a la AT. La ecuación 2.4 muestra la fórmula general para determinar la AT, la cual al igual que la DT se expresa en mg/L como CaCO<sub>3</sub>, mientras que en la Figura 2.1 se muestran las especies iónicas en función del pH, así como las fases de la alcalinidad determinada por el método de titulación.

$$AT = AF + AAM \quad (2.4)$$

Donde:

**AT**= Alcalinidad total

**AF** = Alcalinidad a la fenolftaleína (titular la muestra hasta un pH de 8.3)

**AAM**= Alcalinidad al anaranjado de metilo (titular la muestra hasta un pH de 4.5)

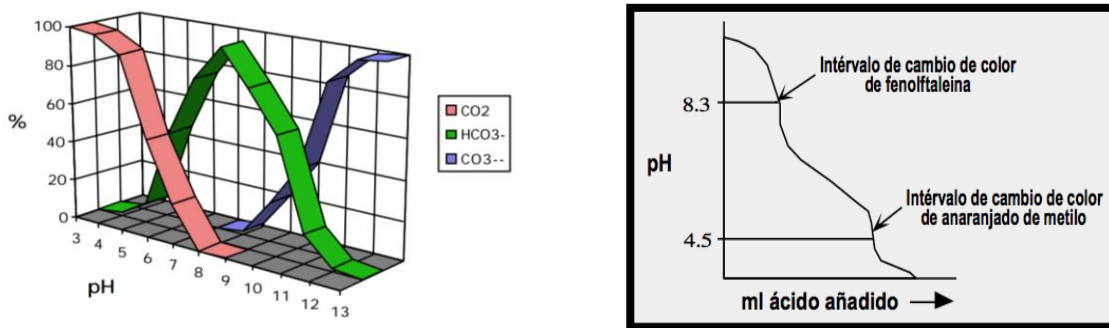


Figura 2.1. Variación de las especies iónicas en función del pH (a) y (b) fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad (Guerra *et al.*, 2008).

<sup>8</sup>La acidez total (AT) es la cantidad de iones hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) en la muestra acuosa y se determina como la capacidad cuantitativa de una muestra de agua para reaccionar con una base fuerte hasta un pH de 8,3 (NMX-AA-036-SCFI-2001).

## 2.2.5 Temperatura

La temperatura es la medida de la energía cinética de las moléculas y expresa la cantidad de calor que contiene una solución, ya sea en grados Kelvin (K) o en grados Celsius (°C). La solubilidad de minerales (iones) depende de la temperatura, algunos son más solubles a medida que aumenta la temperatura, a esto se le llama solubilidad directa o normal. Otros minerales son menos solubles a medida que aumenta la temperatura, a esto se le denomina solubilidad inversa. Ejemplo de ello son las sales de carbonato y sulfato principalmente de calcio y magnesio, las cuales se vuelven menos solubles a medida que aumenta la temperatura, provocando mayores incrustaciones en tuberías cuando las temperaturas son altas. La ecuación 2.5 muestra la fórmula general para convertir grados Kelvin a grados Celsius y viceversa (NMX-AA-007-SCFI-2000), mientras que la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de solubilidad directa e inversa para dos formas del sulfato de calcio: anhídrido y dihidratado (yeso).

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15 \text{ K} \quad (2.5)$$

Donde:

$T(^{\circ}\text{C})$  = Temperatura en grados Celsius

$T(\text{K})$  = Temperatura en Kelvin

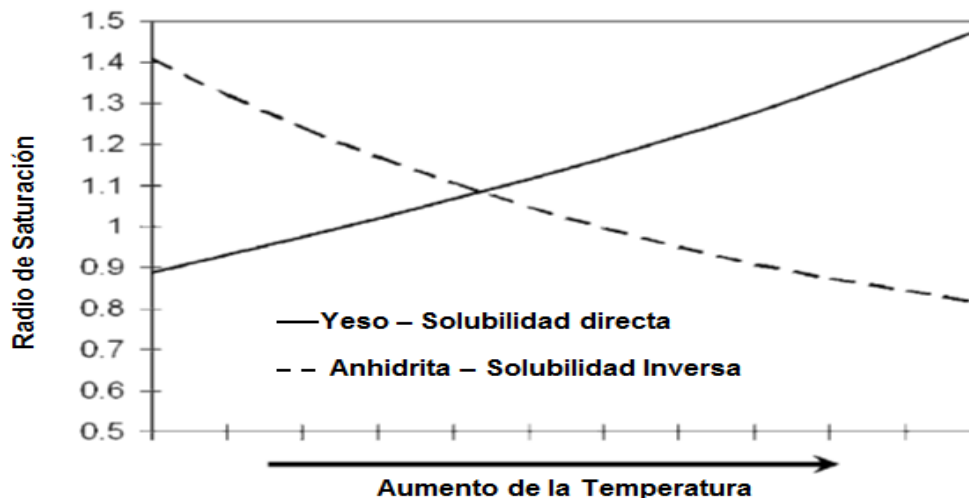


Figura 2.2. Ejemplos de solubilidad directa e inversa para dos formas del sulfato de calcio (Nalco, 2009).

## 2.2.6 pH

De acuerdo a Sørensen (1909), el pH es el logaritmo negativo de la actividad iónica del ion hidrógeno ( $H^+$ ). El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución y sus valores están comprendidos en una escala del 0 al 14, siendo 7 el valor medio. Este valor corresponde a una solución neutra, es decir, donde la concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ) es la misma. Valores por debajo de 7 indican soluciones acidas y valores por encima indican soluciones básicas o alcalinas. Cabe mencionar que el pH es una función logarítmica, por lo que un valor de pH corresponde a una concentración de iones de hidrogeno diez veces más grande que la continua. Por lo anterior, se puede afirmar que a mayor valor de pH menor concentración de hidrógeno y por lo tanto menor acides de la solución.

El agua destilada o desionizada tiene un rango de pH cercano a la neutralidad que va de 6.0 a 6.5 unidades de pH, mientras que el agua salobre o marina tiene un rango de pH mayor a la neutralidad de 7.5 a 8.0 unidades de pH, esto dependiendo de las sales o iones presentes. El pH al igual que la CE y los SDT se puede determinar por métodos establecidos (NMX-AA-008-SCFI-2011), o bien a través de un instrumento de medición, en este caso un potenciómetro. En la ecuación. 2.6 se presenta la formula general para la determinación teórica del pH, mientras que en la Figura 2.3 se muestra la escala de pH en un rango de 0 a 14 unidades.

$$pH = -\log [H^+] \quad (2.6)$$

Donde:

**pH** = Logaritmo negativo de la actividad del ion hidronio

**p** = Matemáticamente es el símbolo del logaritmo negativo

**[H<sup>+</sup>]** = Concentración del ion hidronio

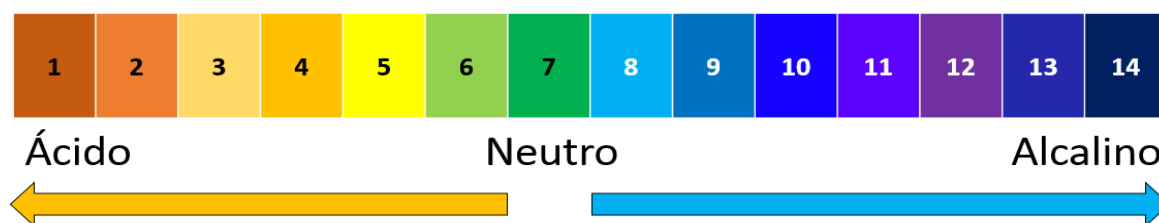


Figura 2.3. Escala de pH (Hernández, 2014).

## 2.3 Desalinización

La desalinización es un proceso de separación que permite obtener agua potable partir del agua con alto contenido de sales. Este proceso se ha implementado desde los años 50's en diferentes partes del mundo principalmente en zonas áridas donde el agua marina o salobre es la única fuente disponible para su potabilización, así como también en lugares donde existen problemas de contaminación de acuíferos por alta salinidad. Inicialmente, las grandes desaladoras de agua de mar se construyeron en lugares cercanos a plantas de procesamiento con energía excedente, o bien donde el costo-beneficio para desalar agua fuera alto, como el Medio Oriente y el Norte de África (Lattemann y Hoepner, 2007).

Hoy en día existen diversas tecnologías de desalinización las cuales se diferencian por: costos, impacto ambiental, calidad del producto y energía consumida, entre otras clasificaciones más Sin embargo, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua salobre o marina, al grado de producir agua destilada o desionizada. Entre estas tecnologías destacan las térmicas y las de membranas. Los costos de operación y consumo energético varían dependiendo de la tecnología empleada. En general, las tecnologías térmicas demandan mayor consumo energético, asociado al cambio fase (evaporación-condensación), lo que se traduce en costos de producción más altos, respecto a las tecnologías de membrana (Devora-Isiordia, 2013).

La Tabla 2.5 muestra una comparación de costos aproximados de producción (USD/m<sup>3</sup>) y consumos energéticos (kWh/m<sup>3</sup>) entre tecnologías térmicas y de membranas a nivel global, mientras que la Tabla 2.6 muestra las tecnologías empleadas para llevar a cabo el proceso de desalinización dependiendo del tipo de separación.

Tabla 2.5. Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos entre tecnologías térmicas y de membranas (Devora-Isiordia, 2013).

Tecnología	Costo de producción	Consumo energético	Recomendable para
Osmosis Inversa (IO)	0.6 USD/m <sup>3</sup>	2.4 a 2.8 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar y salobre
Electrodialisis (ED)	0.32 USD/m <sup>3</sup>	2.0 a 2.5 kWh/m <sup>3</sup>	Agua salobre
Destilación Multiefecto (DME)	1.5 USD/m <sup>3</sup>	3.4 a 4 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar
Destilación Flas Multietapa (DFM)	1.10 USD/m <sup>3</sup>	5 a 8 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar



Tabla 2.6. Clasificación de los procesos de desalinización por el tipo de separación (modificado de Lattemann y Hoepner, 2007).

Tipo de separación	Energía utilizada	Proceso	Sistema
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación Solar (DS)
			Destilación Flash Multietapa (DFM)
	Frio	Cristalización	Destilación Multiefecto (DME)
Agua de sales	Mecánica	Evaporación	Destilación por Membrana (DM)
			Termocompresión de Vapor (TV)
		Filtración	Formación de Hidratos
Agua de sales	Mecánica	Filtración	Congelación
			Compresión Mecánica de Vapor (CMV)
			Destilación por Membrana (DM)
Sales del agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Osmosis Inversa (OI)
			Nanofiltración (NF)
	Química	Intercambio	Electrodialisis (ED)
Sales del agua	Química	Intercambio	Intercambio Iónico

### 2.3.1 Desalinización a nivel mundial

La capacidad mundial total de desalinización va en aumento. Actualmente existen alrededor de 13,000 plantas instaladas, con una producción de casi 30 millones de m<sup>3</sup>/d. Mayormente, se desaliniza agua de mar con un 66% y agua salobre con un 22%. Los sectores donde se obtienen mayor beneficio de este proceso son: el municipal (66%) y el industrial (23%) (Devora-Isiordia, 2013). De acuerdo con Lattemann *et al.* (2010) la mayor producción de agua desalinizada lo realiza el Medio Oriente junto con los Países del Golfo Pérsico (65%), seguido de Europa (12%), África (8%) y Asia (8%) (Figura 2.4).

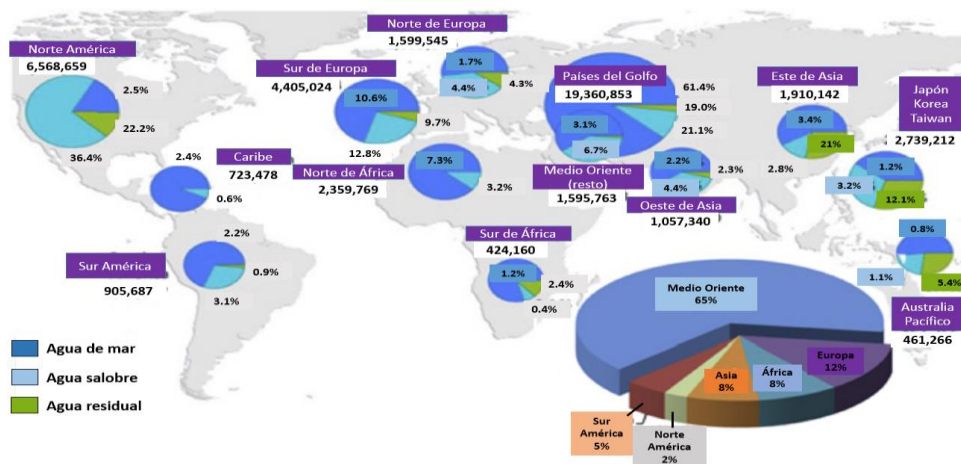


Figura 2.4. Distribución de la capacidad de desalinización a nivel mundial en m<sup>3</sup>/d (Lattemann *et al.*, 2010).

Dentro de los procesos por membranas más conocidos se encuentra la Electrodiálisis (ED); la Destilación por Membrana (DM) y los procesos de filtración como la Nanofiltración (NF) y la Ósmosis Inversa (OI). La OI es la tecnología de desalinización con mayor presencia en México y en diversos lugares del mundo, dada la relación costo-beneficio en la producción de agua potable. Sin embargo, no siempre es la mejor alternativa en lugares remotos por el consumo eléctrico asociado. En la Figura 2.5 se muestra una clasificación de los procesos por membranas de acuerdo con su aplicación y en base a la fuerza impulsora que se quiere para realizar el proceso.

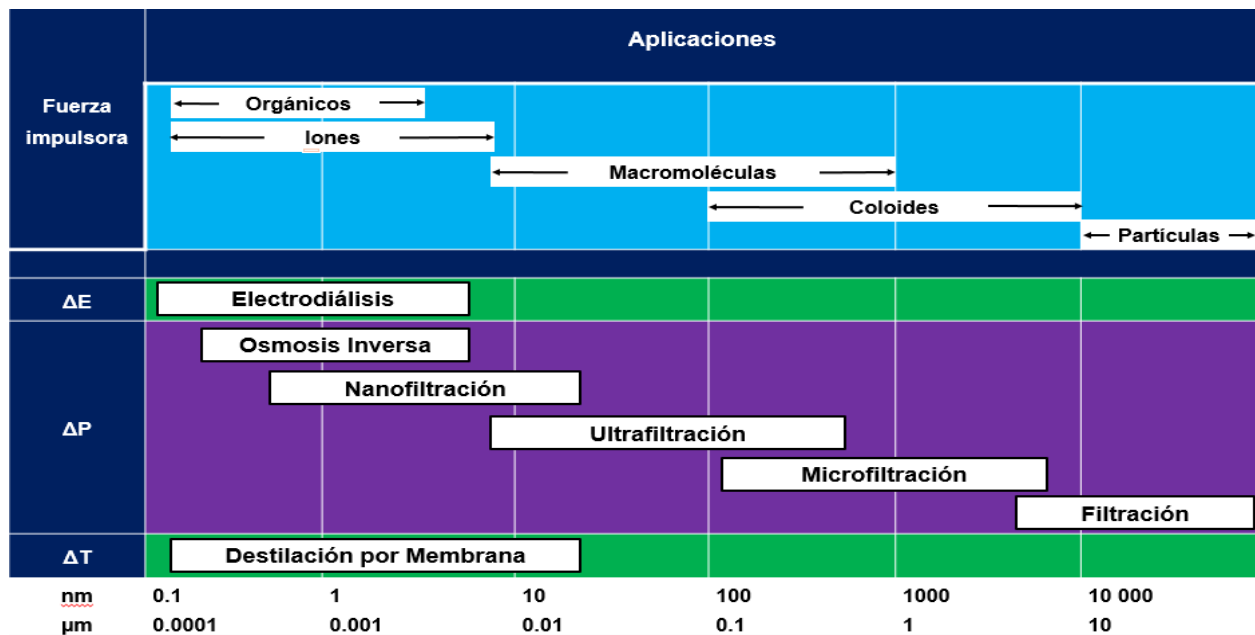


Figura 2.5. Tecnologías de procesos de membrana y sus aplicaciones.

Los países que cuentan con mayor cantidad de plantas desalinizadoras instaladas son los Estados Unidos (2 174), Arabia Saudita (2 086), Japón (1 457) y España (760). Entre los países que tienen entre 100 y 300 plantas están Libia, India, China, Australia, Argelia, Baréin y Omán. La mayoría de estas plantas instaladas utiliza tecnología de membrana, el 50% son de OI, el 33% de NF y 3% ED. Siguiéndole las tecnologías térmicas de compresión de vapor (CV) con el 1%, junto con la Destilación Flash Multietapa (DFM) y Destilación Multiefecto (DME) con el 5% y el 4%, respectivamente. Sólo el 2% de estas plantas instaladas utiliza algún tipo de energía renovable como la solar, la geotérmica o la eólica (IDA, 2010).

### 2.3.2 Desalinización en México

En México, la desalinización se ha empleado desde los 80's y cada vez es más frecuente, principalmente en zonas costeras, las cuales se caracterizan por tener problemas de escases de agua potable. De las 13 000 plantas desalinizadoras instaladas en el mundo, menos del 4% corresponde a México. De acuerdo con el inventario de la IDA (2007) el país cuenta con 435 plantas desalinizadoras, ubicadas en 320 sitios, con una capacidad instalada de 311,377 m<sup>3</sup>/d. Los estados con mayor número de plantas desalinizadoras son Quintana Roo (124) y Baja California Sur (71).

La mayoría de las plantas desalinizadoras instaladas en México utilizan la tecnología de OI. Estas plantas principalmente abastecen de agua potable al sector turismo (57.9%), industrial (31.5%) y municipal (10.6%). Ejemplo de ello, es la planta ubicada en los Cabos (BCS), la cual cubre una parte de la ciudad de Cabo San Lucas. Esta planta produce 200 L/s de agua desalinizada (17 280 m<sup>3</sup>/d), es la más grande del País y el costo de agua potable está alrededor de los 10.5 Mx-pesos/m<sup>3</sup>. Por otra parte, se tiene el registro de que el 32% de las plantas instaladas en México no operan o están fuera de uso, principalmente por los altos costos de mantenimiento y refacciones, la cuales la mayoría son de importación, así como la falta de personal calificado, fallas de operación y carencia de asistencia técnica de los proveedores (IDA, 2010).

En México los costos de electricidad, operación y mantenimiento para los proceso de membrana van de \$0.15 a \$0.33 USD/m<sup>3</sup> y para los procesos térmicos van de \$0.11 a \$0.51 USD/m<sup>3</sup>. El consumo energético promedio en sistemas térmicos es de 3 a 6 kWh/m<sup>3</sup> y en sistemas de membranas por OI, desde agua salobre hasta agua marina, el consumo promedio es de 0.8 a 6 kWh/m<sup>3</sup>. En el país, cuando se utiliza radiación solar como fuente de calentamiento, el dispositivo más utilizado para llevar a cabo la desalinización por un proceso térmico es el de placas planas. Sin embargo, su uso es para la generación de vapor para termoeléctricas, a diferencia de los proceso de OI, que el agua producto puede implementarse en sistemas de riego, consumo humano e industrial (Devora-Isiordia, 2013).

## 2.4 Destilación por membrana (DM)

La DM es una tecnología híbrida derivada de la combinación de un proceso térmico de baja entalpia y un proceso por membrana. El proceso de la DM fue patentado en 1963 y el primer artículo publicado apareció en 1967. Sin embargo, el interés en esta tecnología se desvaneció rápidamente debido en parte, a la baja producción de permeado en comparación con los sistemas de OI. Posteriormente, a principios de 1980, el proceso de la DM recuperó interés debido a la capacidad que tienen para utilizar los residuos de calor de bajo entalpia y/o combinarse con fuentes alternativas de energía, como la energía solar y geotérmica (El-Bourawi *et al.*, 2006).

### 2.4.1 Descripción general del proceso de la DM

La DM es un proceso de separación térmico que tienen fundamento en el principio de la evaporación y la condensación del vapor de agua (El-Bourawi *et al.*, 2006). El proceso de separación involucra transferencia de calor y masa, a través de una membrana porosa e hidrófoba; de ahí el nombre de destilación por membrana. Un sistema básico de la DM está integrado por tres zonas: una zona de calentamiento, una membrana porosa e hidrófoba y una zona de enfriamiento. Al igual que la destilación térmica convencional, en la DM se requiere aumentar la entalpia de la solución que se pretenda separar con el fin de producir vapor. Sin embargo, el proceso de evaporación se lleva a cabo por debajo del punto de ebullición con base en el equilibrio líquido-vapor. En la Figura 2.6 se muestra un diagrama conceptual del proceso de la DM.

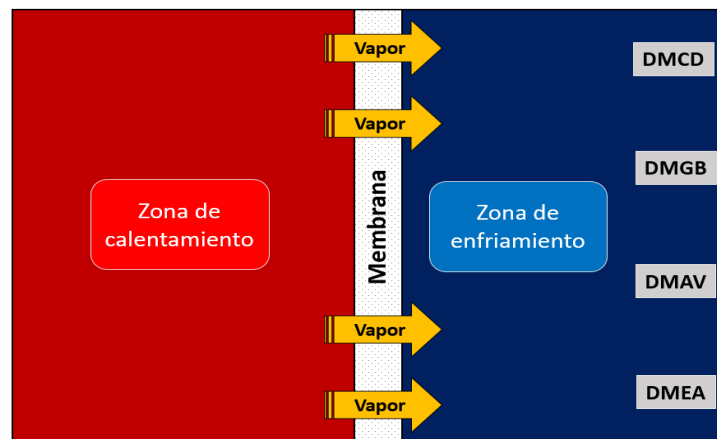


Figura 2.6. Descripción grafica del proceso de la DM.

Para que el proceso de separación se lleve a cabo, es necesario establecer una diferencia de temperatura entre ambas caras de la membrana (caliente y fría). Esta diferencia de temperatura, a su vez, genera una diferencia de presión parcial que favorece la generación de vapor de agua a la entrada de los poros de la membrana que se encuentra en contacto con una solución caliente. Esta diferencia de presiones parciales provoca un flujo neto de vapor de agua a través de la membrana, de la cara caliente hacia la cara fría. El vapor de agua que permea la membrana se recupera como producto condensado en la zona de enfriamiento.

### 2.4.2 Configuraciones empleadas en la DM

Existen cuatro configuraciones empleadas en la DM, las cuales se nombran dependiendo de cómo se recupere el vapor de agua en la zona enfriamiento (Figura 2.7). Estas configuraciones son: por contacto directo (DMCD), con gas de barrido (DMGB), con aplicación de vacío (DMAV) y con espacio de aire (DMEA). En los cuatro casos, el producto resultante es agua desionizada (Dehesa-Carrasco, 2013).

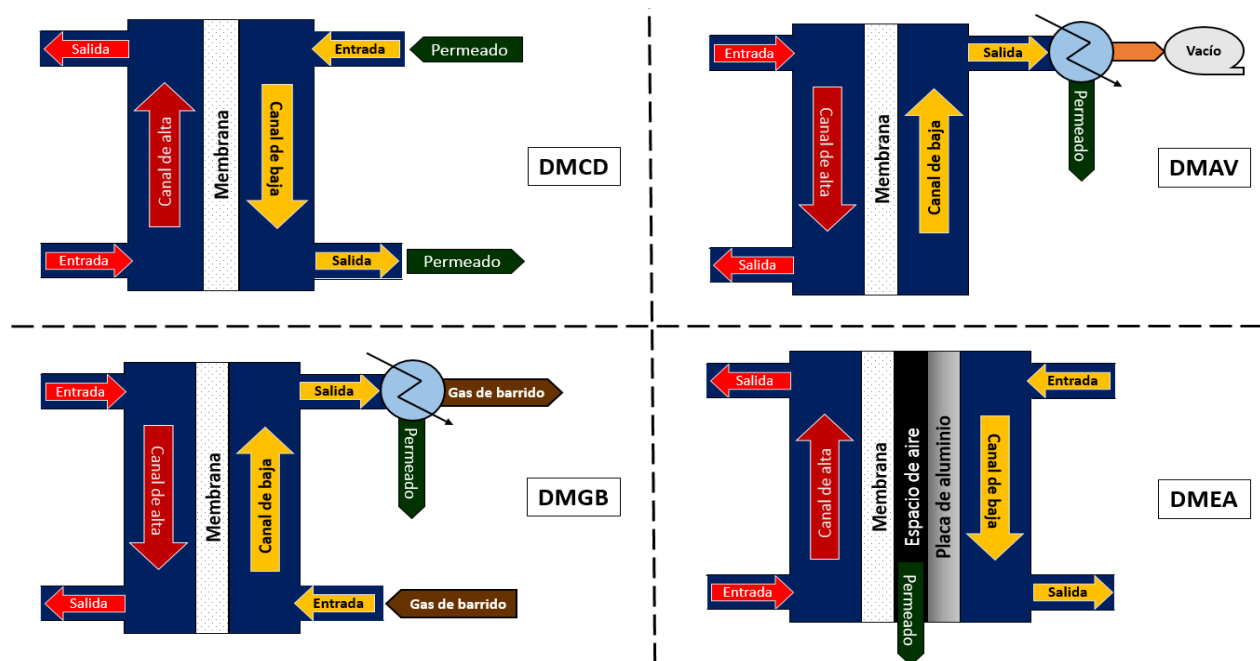


Figura 2.7. Configuraciones empleadas en la DM.

De las cuatro configuraciones existentes en la DM, la mayoría de los trabajos publicados emplean la configuración DMCD (60%), seguido de la configuración DMEA (30%) y, por último, las configuraciones DMGB y DMV (5%). A continuación se realiza una descripción de cada una de las configuraciones empleadas en la DM

### *Destilación por membrana por contacto directo*

Se denomina contacto directo, porque ambas caras de la membrana se encuentran *en contacto directo* con una solución acuosa. Un lado de la membrana está en contacto con la solución salina caliente que se pretende separar, y el otro está en contacto con una corriente de agua desionizada. Como se describe en el proceso general la evaporación ocurre en la interfase de la membrana. Sin embargo, la condensación ocurre sobre la corriente de enfriamiento. Siguiendo este razonamiento, el volumen del canal de enfriamiento aumentaría paulatinamente con el paso del tiempo, esto por el efecto de separación.

La DMCD es la configuración más simple en la DM, y se emplea ampliamente en procesos de desalinización, así como en la separación de soluciones acuosas altamente concentradas en las industrias de alimentos (El-Bourawi *et al.*, 2006). Sin embargo, el principal inconveniente de este diseño es la pérdida de calor por conducción a través de la membrana. Este flujo de calor también es conocido como flujo de calor parásito y afecta en el rendimiento térmico del sistema.

### *Destilación por membrana con gas de barrido*

En esta configuración, un gas inerte frío se introduce en la zona de enfriamiento y se utiliza para “barrer” el vapor y posteriormente condensar el permeado fuera del módulo mediante un condensador auxiliar. Esta configuración es útil para la eliminación de compuestos volátiles de la solución acuosa. La principal desventaja de esta configuración es que un volumen pequeño de permeado se difunde en un volumen grande de gas de barrido, lo que implica un condensador de grande dimensiones para recuperar el condensado.

### *Destilación por membrana con aplicación de vacío*

En esta configuración, se utiliza una bomba para crear un vacío en el lado frío de la membrana. La presión negativa aplicada debe ser menor que la presión de saturación de las moléculas volátiles

presentes en la solución de alimentación. El flujo de vapor que se produce se lleva fuera del módulo de membrana para realizar la condensación. La pérdida de calor por conducción es insignificante, lo que representa una ventaja significativa. Sin embargo, el consumo energético para producir presiones bajas es alto, esto en términos generales se traduce en un consumo mayor de energía del sistema.

### Destilación por membrana con espacio de aire

Una unidad DMEA consta de cinco elementos: una zona de alimentación de alta temperatura, por la cual se hace circular la solución salina caliente; una membrana porosa e hidrófoba, que actúa como una pared permeable al vapor; un espacio de aire, que permite reducir las pérdidas de calor parasitas; una placa de aluminio donde se condensa el vapor de agua y, una zona de enfriamiento que sirva para refrigerar la placa de aluminio (Figura 2.8).

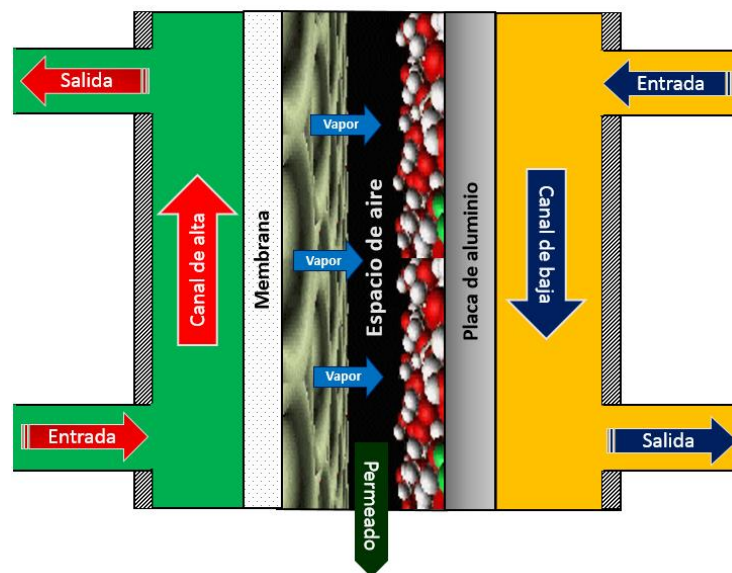


Figura 2.8. Descripción grafica del proceso de la DMEA

La DMEA presenta ventajas significativas respecto a las otras tres configuraciones empleadas en la DM. Por ejemplo, el espacio de aire reduce las pérdidas de calor por conducción a través de la membrana, lo cual disminuye el consumo de energía por unidad de volumen en comparación con la configuración DMCD. Además, no es necesario refrigerar el sistema con agua de mayor calidad o similar a la del permeado obtenido, como es el caso de la configuración DMCD. Esto se puede

realizar utilizando simplemente agua de grifo o agua de menor calidad a la del permeado que deseamos obtener. Otra ventaja de la configuración DMEA radica en la forma de cómo se recupera el permeado en la zona de enfriamiento, la cual se da por gravedad. Esto implica ciertas ventajas respecto a las configuraciones DMAV y DMGB, debido a que no se requiere de equipos auxiliares para trasladar y recuperar el vapor de agua, como una bomba de vacío o un condensador, lo que implica un consumo de energía menor para la obtención del permeado o condensado.

A diferencia de los procesos de destilación convencionales, la evaporación en el proceso de la DMEA ocurre a temperaturas por debajo del punto de ebullición y en un espacio reducido próximo a los 4 mm de espesor, lo que posibilita construir sistemas compactos alimentados con calor de baja entalpía. Esta tecnología funciona a presiones bajas y soporta corrientes de alimentación de alta salinidad, asimismo, puede operar con fuentes de calor residual provenientes de algún proceso industrial y/o combinarse con energías renovables, como son la geotérmica y la solar. Estas características ofrecen ventajas prometedoras para la desalinización y posibilitan el uso de esta tecnología para el tratamiento de aguas con alto contenido de sales



## CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN TEÓRICA

En este capítulo se describe la fenomenología por la cual se lleva a cabo la transferencia de calor y masa en los sistemas DMEA desde una perspectiva teórica. Como introducción al capítulo 3, se describen los conceptos básicos de la composición de una mezcla. Se presentan los conceptos básicos para entender la difusión ordinaria y difusión térmica. Se describen los modelos matemáticos que describen los procesos de transporte gobernantes: transferencia de calor y masa. Posteriormente, se realiza el acoplamiento de ambos modelos para explicar la transferencia de masa por difusión ordinaria y difusión térmica.

### 3.1 Composición de una mezcla

Una mezcla es una combinación de dos o más sustancias, estas sustancias pueden encontrarse en estado sólido, líquido o gaseoso. En una mezcla de origen homogéneo o heterogéneo, los elementos o compuestos individuales se denominan *componentes* o *especies* de la mezcla. La cantidad de cualquier componente o especie "*i*" presente en una mezcla se puede cuantificar de dos maneras: en términos de su densidad de masa  $\rho_i$  (kg/m<sup>3</sup>) o bien, mediante la concentración molar  $C_i$  (kmol/m<sup>3</sup>). La *fracción de masa* es el cociente de la densidad parcial de las especies "*i*" entre la densidad total de la mezcla. La densidad total es el resultado de la sumatoria del cociente de la masa de las especies "*i*" entre el volumen total de la solución. La *fracción molar* tiene la misma analogía que la fracción másica, solo que se expresa en términos de la concentración molar. En la Tabla 3.1 se presenta a manera de resumen, la analogía entre base másica y base molar.

Tabla 3.1. Analogía entre base másica y base molar.

Base másica		Base molar	
Densidad parcial de la especie <i>i</i>	$\rho_i = \frac{m_i}{V}$	Concentración molar parcial de la especie <i>i</i>	$c_i = \frac{N_i}{V}$
Densidad total de la mezcla	$\rho = \frac{m}{V} = \sum \frac{m_i}{V} = \sum \rho_i$	Concentración molar total de la mezcla	$c = \frac{N}{V} = \sum \frac{N_i}{V} = \sum c_i$
Fracción de masa de la especie <i>i</i>	$w_i = \frac{m_i}{m} = \frac{m_i/V}{m/V} = \frac{\rho_i}{\rho}$	Fracción molar de la especie <i>i</i>	$x_i = \frac{N_i}{N} = \frac{N_i/V}{N/V} = \frac{c_i}{c}$

Las concentraciones de base másica y base molar están relacionadas entre sí, mediante el peso molecular de la mezcla de la siguiente manera:

$$C_i = \frac{\rho_i}{M_i} \quad \text{para la especie } i; \quad C = \frac{\rho}{M} \quad \text{Para la mezcla;} \quad w_i = \frac{\rho_i}{\rho} = \frac{C_i M_i}{CM} = x_i \frac{M_i}{M'}$$

Donde  $M$  representa el peso molecular y  $\rho$  es la densidad de la mezcla.

Para una mezcla de gases ideales, la densidad de masa y la concentración molar de cualquier especie " $i$ " está relacionado con la presión parcial de la especie " $i$ ", a través de la ley de gas ideal, es decir:

$$\rho_i = \frac{p_i}{R_i T} \qquad C_i = \frac{p_i}{R_u T}$$

Donde  $T$  es la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ ,  $R_i$  es la constante de los gases para la especie  $i$  y  $R_u$  la constante universal de los gases.

La fracción de masa de la especie " $i$ " ( $w_i$ ) de una mezcla de gases ideales es equivalente a la fracción molar de esa especie " $i$ " ( $x_i$ ) como se muestra en la ecuación 3.1.

$$w_i = \frac{p_i}{p} = \frac{N_i R_u T / V}{N R_u T / V} = \frac{C_i}{C} = x_i \qquad (3.1)$$

### 3.2 Evaporación en la interfase liquido-vapor

La destilación es un proceso de separación donde las especies " $i$ " que componen una mezcla líquida se separan mediante un cambio de fase (evaporación-condensación). Cuando la evaporación del agua ocurre en presencia de aire, la presión de vapor resultante se conoce como *presión parcial del vapor de agua*. El aire posee la capacidad de contener el vapor de agua y la cantidad de vapor que puede retener está en función de la temperatura. En general, la ecuación de Clausius-Clapeyron<sup>9</sup> es la base para determinar la presión parcial del vapor de agua como función de la temperatura. La

<sup>9</sup> En termoquímica, la ecuación de Clausius-Clapeyron es una manera de caracterizar una transición de fase de primer orden que tiene lugar en un sistema. En un diagrama P-T (presión-temperatura), la línea que separa ambos estados se conoce como curva de coexistencia. La relación de Clausius-Clapeyron determina la pendiente de dicha curva.

Figura 3.1 muestra una gráfica de datos experimentales de la curva de saturación del vapor de agua contenido en aire (Cengel 2007; Cengel y Boles, 2012). El sistema representado en esta figura se encuentra a presión total de una atmósfera (101.3 kPa). Existen diversos modelos simplificados derivados de la ecuación de Clausius-Clapeyron, uno de esos modelos es la ecuación de Antonie.

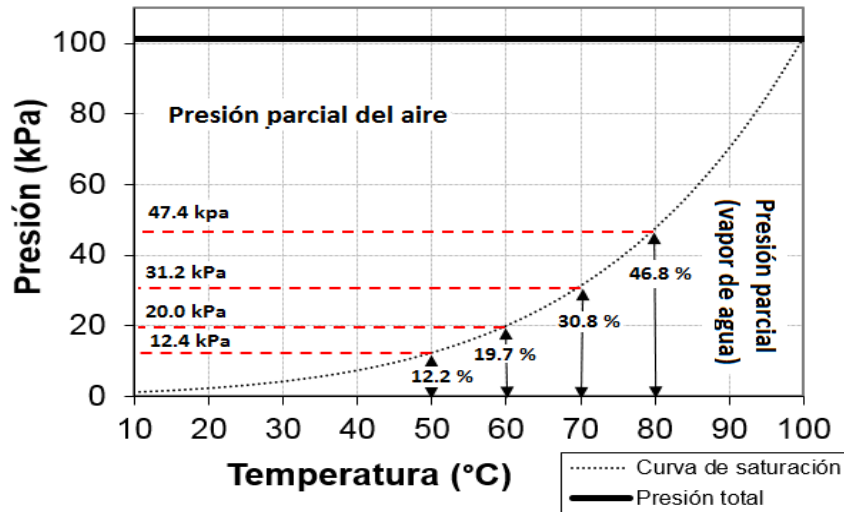


Figura 3.1. Curva de saturación de vapor de agua en aire como función de la temperatura.

La ecuación de Antonie es una simplificación que involucra coeficientes empíricos y es aplicable a sistemas puros, se expresa como:

$$P = \exp\left[A - \frac{B}{T-C}\right] \quad (3.2)$$

Los términos  $A$ ,  $B$  y  $C$  son coeficientes empíricos,  $P$  es la presión parcial y  $T$  es la temperatura. En la Tabla 3.2 se presentan los valores de los coeficientes empíricos empleados en los sistemas DMEA, incluyendo los valores utilizados en este trabajo.

Tabla 3.2. Valores para los coeficientes empíricos de la ecuación de Antonie.

Autor	A	B	C
Ramon <i>et al.</i> (2009)	23.1964	3 816.44	46.13
Banat <i>et al.</i> (1994)	23.237	3 841.2	45
Izquierdo Gil <i>et al.</i> (1999)	23.231	3 843	45

### 3.3 Descripción del modelo físico

El proceso de evaporación se lleva a cabo a la entrada de los poros de la membrana, el vapor de agua resultante se mueve través de la membrana inducido por un fenómeno de transporte conocido como difusión<sup>10</sup>. El movimiento neto de masa es el resultado de la suma de dos contribuciones: difusión ordinaria y difusión térmica. La primera es asociada a un gradiente de concentración y la segunda a un gradiente de temperaturas. En ambos casos la “fuerza impulsora” del proceso de difusión es una diferencia de temperatura entre ambos canales de alimentación (caliente y frío).

Paralelo al flujo de masa existe una transferencia de calor en la misma dirección al flujo neto de masa. Este flujo de calor al igual que el flujo neto de masa, es inducido por la diferencia de temperaturas que existe entre los canales de alimentación. La transferencia de calor a través del sistema compuesto de un sistema DMEA se lleva a cabo mediante dos mecanismos: transferencia de calor asociado al cambio de fase (calor latente) y transferencia de calor por conducción (calor sensible). Cuando el proceso de difusión ocurre de manera simultánea el fenómeno de transporte es conocido como efecto Soret<sup>11</sup>.

Desde el punto de vista conceptual, los procesos internos en un sistema DMEA se llevan a cabo de la siguiente manera. Las moléculas de agua contenidas en la solución salina caliente que circulan por el canal de alimentación, migran del centro de la corriente ( $T_1$ ) a la entrada del poro de la membrana. En este punto ocurre un cambio de fase con base en el equilibrio termodinámico líquido-vapor a una temperatura  $T_2$ . Debido al gradiente de presión parcial que existe entre ambas caras de la membrana ( $T_3$ ), el vapor de agua resultante se difunde a través de los poros de la membrana y posteriormente a través del espacio de aire. Finalmente, el vapor de agua se condensa formando una película de condensado ( $T_4$ ) sobre la superficie expuesta de la placa refrigerada ( $T_5$ ). La cara posterior de la placa de refrigeración ( $T_6$ ) es cubierta con agua de menor temperatura, proveniente del canal de enfriamiento ( $T_7$ ). Un esquema conceptual del interior de la unidad desalinizadora DMEA se muestra en la Figura 3.2.

<sup>10</sup> La difusión es un proceso físico irreversible, de movimiento molecular, a través del cual las partículas ingresan a un medio ausente, lo que aumenta la entropía (desorden molecular) del sistema formado por las partículas difundidas y el medio donde se difunden. En otras palabras, la difusión es un movimiento macroscópico de los componentes del sistema debido a diferencias (o gradiente) de concentración.

<sup>11</sup> Efecto Soret: cuando el gradiente de temperaturas provoca también un transporte de materia. El efecto inverso, cuando un gradiente de concentración produce un transporte de calor, se conoce como efecto Dufour.

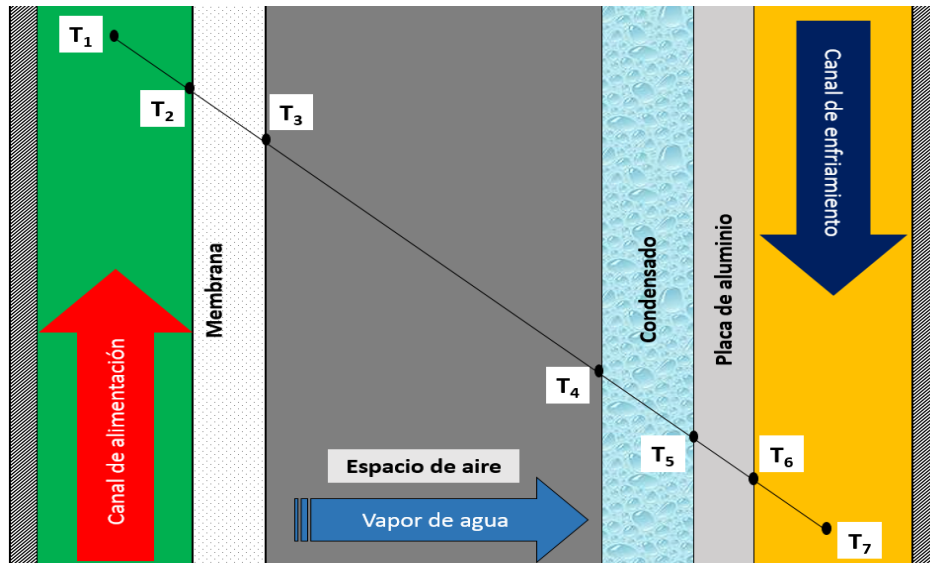


Figura 3.2. Esquema conceptual de transferencia de masa y calor al interior de la unidad DMEA

### 3.3.1 Difusión ordinaria

El modelo que describe la difusión ordinaria se conoce como ley de Fick. Esta ley establece que la velocidad de flujo ( $\frac{dn_A}{dt}$ ) a través de un plano, es proporcional al área del mismo ( $A$ ) y al gradiente de concentración ( $\frac{dC_A}{dz}$ ), tal y como se muestra en la ecuación 3.3.

$$\frac{dn_A}{dt} = -D_{AB} A \frac{dC_A}{dz} \quad (3.3)$$

El término  $D_{AB}$  se conoce como el coeficiente de difusión y está expresado en  $m^2/s$ . Se debe de tener en cuenta que el orden de los subíndices se refiere a la difusión de  $A$  (vapor de agua) en una mezcla con  $B$  (aire), por lo que  $D_{AB} \neq D_{BA}$ . El coeficiente de difusión de los gases depende sólo ligeramente de la composición, incrementa al aumentar la temperatura y disminuye cuando aumenta la presión (Incropera y DeWitt, 1996). Si la difusión tiene lugar en más de una dimensión la primera ley de Fick debe expresarse en forma vectorial, tal y como se muestra en la ecuación 3.4.

$$\dot{N}_A = -CD_{AB} \nabla x_A \quad (3.4)$$

Donde el término  $\dot{N}_A$  representa el flujo molar del vapor de agua y se expresa en  $\text{kmol}/\text{sm}^2$ . Los términos  $C$  y  $x_A$  es el número total de moles y la fracción molar del vapor de agua, respectivamente. El operador vectorial nabra ( $\nabla$ ) indica que el flujo másico o molar del vapor de agua, puede llevarse a cabo en las tres direcciones del eje cartesiano ( $x, y, z$ ). Una forma equivalente de expresar el transporte absoluto del vapor de agua es como sigue:

$$\dot{N}_A = -CD_{AB} \nabla x_A + x_A (\dot{N}_A + \dot{N}_B) \quad (3.5)$$

En la ecuación 3.5 el término de la izquierda representa la contribución de la difusión ordinaria, y el término de la derecha representa el flujo debido al movimiento del vapor de agua respecto al movimiento promedio de la mezcla. Una deducción algebraica detallada de esta ecuación se presenta en el anexo A.

### 3.3.2 Difusión térmica

La difusión térmica tiene fundamento en la cinética de las partículas, es decir, a mayor temperatura la excitación local de las partículas también es mayor lo que se traduce en una presión parcial local que provoca un movimiento hacia la dirección de menor temperatura. Análogamente al modelo de difusión ordinaria, el modelo para difusión térmica se puede expresar como se muestra en la ecuación 3.6 (Bird, 2002).

$$\dot{N}_A = -CD_{AB} K_T \frac{\nabla T}{T} + x_A (\dot{N}_A + \dot{N}_B) \quad (3.6)$$

Donde  $T$  es la temperatura,  $K_T$  es coeficiente de difusión de acoplamiento térmico. Cuando  $K_T$  es positivo, la componente A (vapor de agua) se mueve hacia la región fría y, hacia la caliente si es negativo. Una deducción detallada de estas ecuaciones se presenta en el anexo B.

### 3.3.3 Procesos de transporte combinados

El flujo de masa (vapor de agua) a través de la membrana y el espacio de aire, es el resultado de dos procesos de transporte combinados: difusión ordinaria y difusión térmica. El primero es

proporcional al gradiente de concentración y el segundo está asociado con la diferencia de temperatura. En la interfaz vapor-aire de la membrana existe una evaporación con base en el equilibrio líquido-vapor; es decir, la concentración parcial del vapor de agua en el aire es función de la temperatura del canal de alimentación. Sin embargo, la difusión neta depende de la diferencia de concentración parcial y de la temperatura a través de la membrana y el espacio de aire. El potencial que permite que ocurra el fenómeno está relacionado con la diferencia de temperatura entre los canales de alimentación y de enfriamiento como se ha descrito previamente. El flujo molar es el resultado de las contribuciones de ambos mecanismos y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{N}_A = -CD_{AB} \left( \nabla x_A + K_T \frac{\nabla T}{T} \right) + x_A (\dot{N}_A + \dot{N}_B) \quad (3.7)$$

Donde  $\dot{N}_A$  representan el flujo molar ( $\text{kmol/s}\cdot\text{m}^2$ ),  $K_T$  es el coeficiente de acoplamiento a la temperatura promedio  $T$ . El primer término es el resultado de los procesos de transporte combinados: difusión ordinaria y difusión térmica. El segundo término de la ecuación resulta de cambiar el marco de referencia móvil a coordenadas fijas de referencia. Los subíndices  $A$  y  $B$  hacen referencia a los dos compuestos presentes: vapor de agua y aire, respectivamente. Tomando en cuenta que el aire al interior del gap es aire estancado, es decir  $\dot{N}_B = 0$ , al factorizar la ecuación 3.7, se obtiene:

$$\dot{N}_A = \frac{-CD_{AB}}{1 - x_A} \left( \nabla x_A + K_T \frac{\nabla T}{T} \right) \quad (3.8)$$

La solución de la ecuación 3.8 toma en cuenta las siguientes consideraciones (Figura 3.3):

- Condiciones estacionarias de operación
- Película descendente sin ondulaciones cuyo espesor,  $l_c \ll l_{ea}$
- Que el espesor de la membrana,  $l_m \ll \delta$
- No se desarrolla convección natural al considerar  $l_{ea} < 5 \text{ mm}$
- Membrana porosa e hidrófoba  $\therefore \Rightarrow x_{A,3} \cong x_{A,2}$

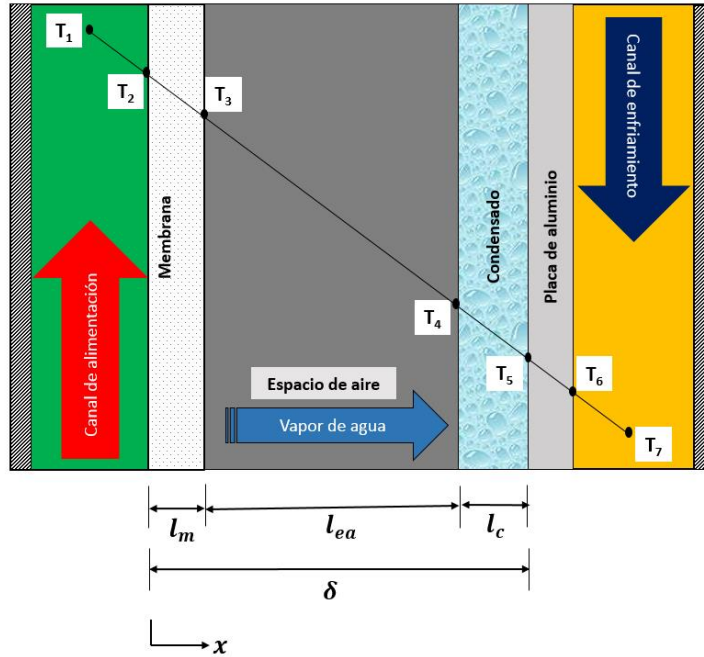


Figura 3.3. Condiciones de frontera al interior de una unidad DMEA

Dado que la longitud característica del sistema en la dirección "y" es mucho mayor que el espesor del sistema compuesto por membrana-espesor de aire, y que la temperatura de la solución es uniforme en la dirección "z", entonces es posible considerar que la difusión combinada se lleva a cabo en una sola dirección "x". En este contexto, evaluando en los límites correspondientes a la región del espacio de aire-membrana (dirección x), se obtiene:

$$\int_0^{\delta} \dot{N}_A dx = -CD_{AB} \int_{A,0}^{A,\delta} \frac{dx_A}{1-x_A} + \frac{-CD_{AB}K_T}{1-x_A} \int_{T_2}^{T_4} \frac{dT}{T} \quad (3.9)$$

Integrando, aplicando propiedad de logaritmos y despejando se obtiene:

$$\dot{N}_A = -\frac{CD_{AB}}{\delta} \ln \frac{1-x_{A\delta}}{1-x_{A0}} - \left\langle \frac{CD_{AB}K_T}{1-x_A} \right\rangle \frac{1}{\delta} \ln \frac{T_4}{T_2} \quad (3.10)$$

La ecuación 3.10 representa la solución general a la ecuación 2.8 y describe el proceso de transporte de masa combinado.



### 3.4 Transferencia de calor a través del sistema

La transferencia de calor a través del sistema, establecido por la diferencia de temperatura entre el canal de alimentación y el canal de enfriamiento, se lleva a cabo en varias etapas: *primero*, el calor se transfiere del canal de alimentación a la superficie de la membrana mediante un mecanismo de convección; *segundo*, una fracción del calor total transferido se deriva en calor latente de evaporización, mientras que la fracción restante se transfiere por conducción a través de la membrana y el espacio de aire. De acuerdo con Bouguecha *et al.* (2002) en espesores de aire menores a 5 mm la convección no se logra desarrollar completamente. En este sentido, considerar que la transferencia de calor a través del espacio de aire ocurre por conducción es una simplificación que tiene sentido físico en el proceso; *tercero*, el calor que se conduce a través del aire (sensible) y el calor cedido por la condensación (latente), ambos se transfieren a la película de condensado; *cuarto*, este calor a su vez se transfiere a través de la placa de refrigeración y al canal de enfriamiento respectivamente. En publicaciones previas se han discutido las ecuaciones para la conservación de flujo de entalpía. Dentro de las publicaciones que se citan destacan los trabajos realizados por los siguientes autores Izquierdo-Gil *et al.* (1999) y Dehesa-Carrasco *et al.* (2013).

Retomando la teoría previamente desarrollada, una forma simplificada de las ecuaciones de flujo de entalpía se expresan como sigue:

En la membrana

$$h_1(T_1 - T_2) = N_A \lambda_A + \frac{k_m}{\delta_m} (T_2 - T_3) \quad (3.11)$$

En el espacio de aire

$$h_1(T_1 - T_2) = N_A \lambda_A + \frac{k_{gap}}{\delta_{gap}} (T_3 - T_4) \quad (3.12)$$

En la película de condensado

$$h_1(T_1 - T_2) = h_4(T_4 - T_5) \quad (3.13)$$

En la placa de refrigeración

$$h_1(T_1 - T_2) = \frac{k_p}{\delta_p} (T_5 - T_6) \quad (3.14)$$

En el canal de enfriamiento

$$h_1(T_1 - T_2) = h_6(T_6 - T_7) \quad (3.15)$$

El calor transferido del canal de alimentación hacia la membrana está dada por:

$$Q_G = Ah_1(T_1 - T_2) \quad (3.16)$$

Las ecuaciones descritas se pueden simplificar en una expresión matemática como función de la temperatura del canal de alimentación y la temperatura del canal de refrigeración ( $T_1$  y  $T_2$ , respectivamente). El sistema de ecuaciones, de 2.12 a 2.16, se resuelve con el objetivo de eliminar las temperaturas intermedias ( $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_4$ ,  $T_5$  y  $T_6$ ). Una descripción detallada fue presentada por Dehesa-Carrasco *et al.* (2013).

Por lo anterior el flujo de calor a través del sistema compuesto se expresa como:

$$Q_G = \frac{\psi\omega}{\psi+k_{eq}} [N_A\lambda_A + k_{eq}(T_1 - T_7)] \quad (3.17)$$

Los parámetros  $\psi$ ,  $\omega$ ,  $k_{eq}$ ,  $h_{eq}$  representan las características hidrodinámicas y de diseño se definen como sigue:

$$\psi = \frac{h_6k_p}{\delta_p h_6 + k_p} \quad (3.18)$$

$$\omega = \frac{h_{eq}}{k_{eq} + h_{eq}} \quad (3.19)$$

$$k_{eq} = \frac{k_m k_{gap}}{\delta_{gap} k_m + \delta_m k_{gap}} \quad (3.20)$$

$$h_{eq} = \frac{h_1 h_4}{h_1 + h_4} \quad (3.21)$$

Donde  $k_p$  es la conductividad térmica de la placa condensadora y  $l_p$  el espesor.  $k_m$  la conductividad térmica de la membrana y  $l_m$  el espesor de la misma.  $k_{aire}$  la conductividad térmica del espacio entre la membrana y la placa condensadora y  $l_{aire}$  el espesor.

Los coeficientes de transferencia de calor  $h_1$  y  $h_6$ , para el canal de alimentación y enfriamiento respectivamente, se obtienen mediante correlaciones empíricas. Gryta *et al* (1997) recomiendan que para flujo laminar (Número de Reynolds ( $Re$ )  $< \approx 2100$  y Número de Prandtl ( $Pr$ )  $> 0.6$ ) sobre una superficie rugosa (membrana) isotérmica, el coeficiente local de convección se puede estimar mediante la siguiente relación

$$h_1 = 0.13Re^{0.64}Pr^{0.38} \frac{k}{d_h} \quad (3.22)$$

Por otra parte, para superficies lisas como la placa de enfriamiento y bajo las mismas condiciones hidrodinámicas, el valor de  $h_6$ , se puede estimar mediante la siguiente relación (Dehesa-Carrasco *et al.*, 2013).

$$h_6 = 3.66 + \frac{0.0668(RePr d_h/L)}{1+0.045(RePr d_h/L)^{2/3}} \quad (3.23)$$

Para estimar el coeficiente de transferencia de calor en película descendente del condensado se emplea la siguiente expresión

$$h_4 = \frac{4}{3} \left[ \frac{k_f^3 \rho_f^2 g}{3\mu_f \Gamma} \right] \quad (3.24)$$

La cantidad  $\Gamma$  es el flujo total de condensado en la parte inferior de la superficie condensadora por unidad de anchura de esta superficie (Bird, 2002). La dependencia de la viscosidad  $\mu_f$  con la temperatura está dada por (Gryta *et al*, 1997).

$$\mu_f(T) = 0.001 \exp \left[ -6.4313 + \frac{1882}{T} \right] \quad (3.25)$$

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el diseño de la unidad desalinizadora DMEA, así como la construcción del arreglo experimental del sistema desalinizador. Esta sección contiene información de los equipos utilizados en la instrumentación del prototipo experimental. En esta sección se menciona como se realizó la preparación de las soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación, así como los parámetros físicos y químicos que se evaluarán para determinar la calidad del agua de alimentación y del agua de permeado. Finalmente, se describen los parámetros térmicos para evaluar la unidad DMEA. Cabe mencionar que las bombas eléctricas, así como los sistemas auxiliares térmicos no fueron tomados en consideración en la evaluación.

### 4.1 Metodología experimental

En la Figura 4.1 se muestra en forma gráfica la metodología utilizada para este trabajo. Primero, se realizó el diseño de la unidad desalinizadora DMEA, así como el diseño experimental del sistema desalinizador. Una vez realizadas las pruebas de fugas en el sistema se procede a realizar la calibración de los instrumentos de medición y puesta a punto el sistema. En esta etapa, se prepararon las soluciones de alimentación con las respectivas sales a utilizar, una a la vez, para realizar el set de pruebas correspondiente. En total se realizaron catorce pruebas, divididas en dos categorías que corresponden a las membranas evaluadas de PTFE y PVDF con un tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ . En cada grupo se emplearon las siguientes soluciones: agua destilada como blanco, solución NaCl (5 g/L), solución CaSO<sub>4</sub> (2 g/L) y mezcla de NaCl (2 g/L) y CaSO<sub>4</sub> (1 g/L).

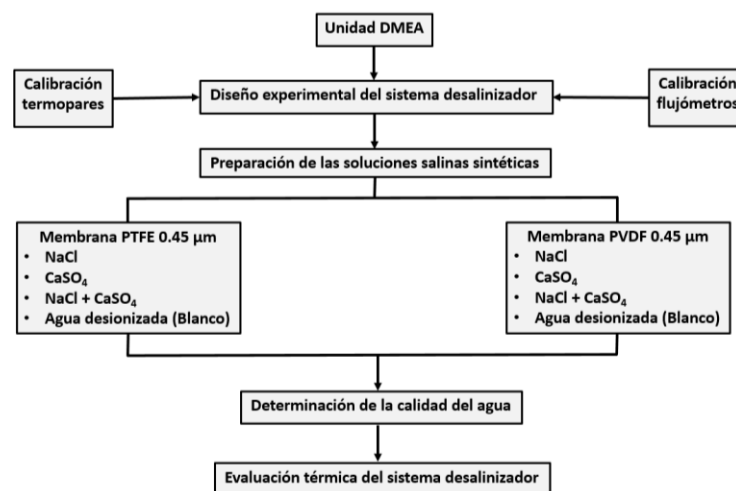


Figura 4.1. Metodología general del trabajo.

## 4.2 Descripción de la unidad desalinizadora DMEA

De las pruebas realizadas, ocho se desarrollaron de manera específica para realizar la evaluación térmica. Esta evaluación tiene como objetivo cuantificar el volumen de permeado y el consumo de energía requerido para realizar el proceso de separación empleando las membranas descritas (PTFE y PVDF) en una unidad DMEA. De acuerdo con García-Rodríguez (2001) para la evaluación de un sistema se debe tener en cuenta los elementos principales y auxiliares. Sin embargo, como el autor refiere en su publicación, la evaluación a menudo se realiza únicamente en un elemento central como un prototipo experimental. El prototipo utilizado en esta tesis es una unidad modular de placas paralelas previamente desarrollada por Dehesa-Carrasco *et al.* (2013). En esencia la unidad DMEA es un soporte de placas que permite evaluar membranas planas con diferentes tamaños de poros.

Previo a esta tesis, los desarrolladores de la unidad realizaron un estudio térmico empleando membranas de PTFE de 0.22  $\mu\text{m}$  de tamaño de poro. Sin embargo, al utilizar una membrana con un poro de mayor tamaño la producción de permeado aumenta, como lo describe Alkudhiri *et al.* (2012 y 2013). Siguiendo esta lógica, al aumentar la producción de permeado el consumo de energía también aumenta. En este contexto la evaluación térmica que se propone en esta tesis consiste en cuantificar el volumen de permeado y el consumo de energía empleando dos tipos de membranas con un mismo tamaño de poro.

Para este estudio se considera siguiente:

- Cuantificar la producción del permeado con relación a la temperatura de la solución alimentación, empleando como influente agua desionizada y dos tipos de membranas. El objetivo consiste en establecer una base para el estudio de las otras mezclas salinas.
- Determinar los efectos sobre la producción de permeado como función de la temperatura de alimentación, empleando las mezclas descritas en los dos tipos de membranas.
- Determinar los parámetros térmicos. Estos parámetros se describen en la sección 4.8
- Determinar el porcentaje de calor susceptible a recuperar.

La metodología para realizar estas pruebas fue la siguiente: Una vez puesto a punto el sistema se fija la temperatura y el flujo de alimentación en un valor constante. La temperatura de alimentación se mantuvo en un intervalo de 50 a 80°C con incrementos de 10°C en cada prueba. Sin embargo,

el flujo de alimentación se fija en un valor nominal de 0.45 l/min en ambos canales de alimentación. El tiempo de duración de cada prueba fue medido con un cronómetro y la duración promedio de prueba fue de alrededor de 40 min a partir del estado estacionario. Además de cuantificar la producción de permeado, en cada una de las pruebas anteriores, se evaluaron el SDT, CE y pH. El conjunto de pruebas restante, se realizaron para evaluar la calidad del agua en el sistema. Finalmente, se procedió a determinar la calidad del agua tanto del influente (agua de alimentación) como del efluente (permeado) con membranas de PTFE y PVDF con un tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$ .

### 4.3 Descripción de la unidad desalinizadora DMEA

En la Figura 4.2 se muestran las componentes de la unidad desalinizadora DMEA por separado, así como la unidad ensamblada. La unidad DMEA consta de dos paredes laterales de Nylon con un espesor de 254 mm; una membrana porosa e hidrófoba que puede ser de PTFE o PVDF; una placa condensadora de aluminio; varias juntas espaciadoras de polipropileno (neopreno) y de silicón con un espesor de 3 y 1 mm, respectivamente; y por último, una malla de alambre de metal revestido romboidal para dar soporte a la membrana. Las componentes descritas anteriormente, se sujetan mediante 12 tornillos de hierro galvanizado, dando como resultado una unidad de desalinización compacta. La unidad desalinizadora DMEA mide 30 cm de alto, 20 cm de ancho y 6.7 cm de espesor. La decisión de construirla en este tamaño se debió en parte, a la restricción impuesta por las membranas que se pudieron conseguir en México, comercializadas por la empresa Millipore, las cuales limitan usar un área efectiva de 144  $\text{cm}^2$  en una configuración rectangular de 18 x 8 cm. A continuación, se realizar una descripción más detallada de las membranas utilizadas en este trabajo, así como de las componentes principales que conforman la unidad DMEA.

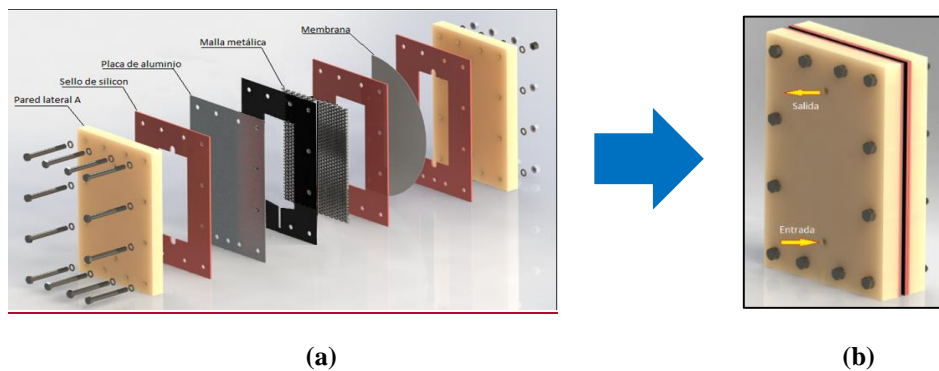


Figura 4.2. Componentes de la unidad DMEA (a) y unidad ensamblada (b).

### 4.3.1 Placas laterales de Nylon

Se decidió construir las tapas laterales de Nylon (Nyacero) por dos razones básicas. La primera, la baja conductividad del material minimiza las pérdidas de calor por las caras laterales y además posee suficiente rigidez para dar soporte estructural a todo el sistema. La segunda, este material no reacciona ante la presencia de las sales como: NaCl y CaSO<sub>4</sub>, eliminando con ello, los problemas de corrosión.

### 4.3.2 Juntas de neopreno y silicón

Las juntas que forman el canal de alta y baja, están elaboradas a partir de láminas de silicón de alta temperatura. Estas componentes actúan como separador y a la vez como sello cuando se sujeta todo el sistema para formar los canales de alimentación, enfriamiento y espacio de aire, respectivamente. El canal de alimentación entre la membrana hidrófoba y la tapa lateral se forma por dos juntas de silicón las cuales permite un espacio de 80 mm de ancho, 180 mm de altura 6 mm de profundidad. El canal de enfriamiento que se forma entre la segunda tapa lateral de silicón y la placa de aluminio, tiene las mismas dimensiones que la primera. El espacio de aire de 3 mm de espesor se logra con una junta de neopreno.

### 4.3.3 Placa condensadora

La placa condensadora es una placa de aluminio de 1.2 mm de espesor (Alanod). La función principal es condensar el vapor de agua que pasa a través de la membrana. Por otro lado la placa de neopreno adyacente a la placa de aluminio forma un canal de drenado de permeado, este detalle se puede apreciar en la Figura 4.2 (a).

### 4.3.4 Soporte metálico para la membrana

La membrana porosa e hidrófoba se soporta por una malla metálica con el propósito de reducir la deformación debida tanto a la presión que ejerce el flujo (principalmente el peso del agua), como a la temperatura de operación. El soporte metálico es una malla de forma romboidal con eje mayor de 10 mm, eje menor de 7 mm y espesor de alambre de aproximadamente 0.6 mm. A fin de evitar la corrosión el soporte metálico y malla fueron tratados con un recubrimiento plástico.

### 4.3.5 Membranas hidrófobas de PTFE y PVDF

Las membranas hidrófobas de PTFE y PVDF utilizadas en este trabajo, están hechas de polímeros orgánicos sintéticos y tienen aproximadamente un tamaño de poro nominal de 0.45  $\mu\text{m}$ . La presentación de las membranas de PTFE, es en forma circular con un diámetro de 29.2 cm, conteniendo 25 piezas por paquete; mientras que las membranas PVDF son en rollo de 26.5 cm x 3.75 m, tal y como lo muestra la Figura 4.3 (a) y (b).



Figura 4.3. Membranas Millipore de 0.45  $\mu\text{m}$  de PTFE (a) y PVDF (b).

### 4.4 Descripción del sistema desalinizador

En la Figura 4.4 se muestra un diagrama conceptual del diseño experimental. El sistema está integrado por dos zonas de calentamiento (sección A y B), una unidad desalinizadora DMEA (sección C) y una zona de enfriamiento (sección D). El arreglo para el estudio experimental está diseñado de tal manera que sea posible suministrar a la unidad DMEA la solución salina caliente de entrada y el agua de enfriamiento con temperaturas y caudales controlados. Con ese fin, está integrado por los siguientes elementos: resistencias eléctricas para el suministro de energía térmica, tanques de almacenamiento térmico, un intercambiador de calor, bombas hidráulicas para impulsar la corriente y la unidad desalinizadora DMEA. Cabe mencionar que los termotanques, así como la tubería y las bombas, están cubiertas de hule espuma de 1 cm de espesor, esto con el propósito de minimizar pérdidas de calor al ambiente. La descripción de los componentes del sistema desalinizador se realizan por separado.



**Ubicación de Termopares:**

1. Interior de la unidad DMEA (anverso de la membrana)
2. Interior de la unidad DMEA (reverso de la membrana)
3. Salida de la solución salina caliente de la unidad DMEA
4. Entrada de la solución salina caliente a la unidad DMEA
5. Entrada del agua de enfriamiento a la unidad DMEA
6. Salida del agua de enfriamiento de la unidad DMEA
7. Temperatura ambiente
8. Salida de agua caliente del termostanque de 20 L
9. Salida de la solución salina caliente del termostanque de 30 L
10. Salida del agua de enfriamiento del tanque de 100 L

- ⇨ Flujo de agua caliente
- ⇨ Flujo de solución salina caliente
- ⇨ Flujo de agua de enfriamiento



**Simbología:**

- Bomba
  - Resistencia eléctrica
  - Válvula de paso
  - Serpentín
  - Flujómetro
  - Termopar
- A Zona de calentamiento (A)  
 B Zona de calentamiento (B)  
 C Unidad DMEA  
 D Zona de enfriamiento

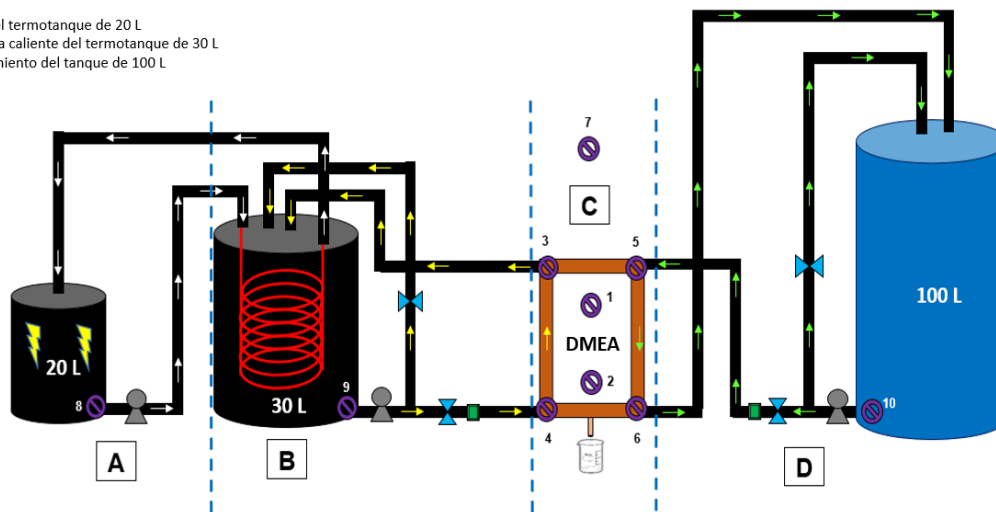


Figura 4.4. Diseño experimental del sistema desalinizador.

### 4.4.1 Zona de calentamiento

La zona de calentamiento está dividida en dos secciones A y B. La sección A, está integrada por una bomba hidráulica de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115 y un termostanque de 20 L, el cual, contiene en su interior cuatro resistencias eléctricas marca Voltech de 750 W como fuente de suministro de energía térmica. El fin de esta sección, es aumentar la temperatura de la solución salina sintética que estará contenida en el termostanque de 30 L de la sección B. Este fin se logra por medio de la recirculación de agua de grifo caliente, la cual, pasará constantemente por un intercambiador de calor de acero inoxidable en forma de serpentín contenido en el interior del termostanque de 30 L de la sección B hasta lograr la temperatura deseada.

La sección B está integrada por una bomba hidráulica de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115, dos válvulas de paso marca Foset para controlar el flujo, un flujómetro de precisión marca IR-Opflow Tipo 1 para medir el flujo. Un termostanque de 30 L de capacidad, un intercambiador de calor en forma de serpentín de acero inoxidable para evitar la

oxidación por la sales. El objetivo de este arreglo, es suministrar solución salina sintética caliente a la unidad DMEA por medio de una bomba de recirculación. La solución salina sintética que no logre evaporarse dentro de la unidad DMEA, regresará al termotanque de 30 L para seguir recirculándose.

#### 4.4.2 Unidad desalinizadora DMEA

La sección C, está integrada por la unidad desalinizadora DMEA con dimensiones de 30 cm x 20 cm x 6.7 cm, la cual a su vez, puede contener alguna de las dos membranas a utilizar de PTFE o PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ . En esta sección se lleva a cabo, en el interior de la unidad, el proceso de evaporación-condensación. Para este fin, se recirculará solución salina caliente por un lado, la cual, será suministrada por la zona de calentamiento (sección B); y por el otro lado, se recirculará agua a temperatura ambiente suministrada por la zona de enfriamiento (sección D). La Figura 4.5 muestra una imagen de la unidad DMEA instrumentada.

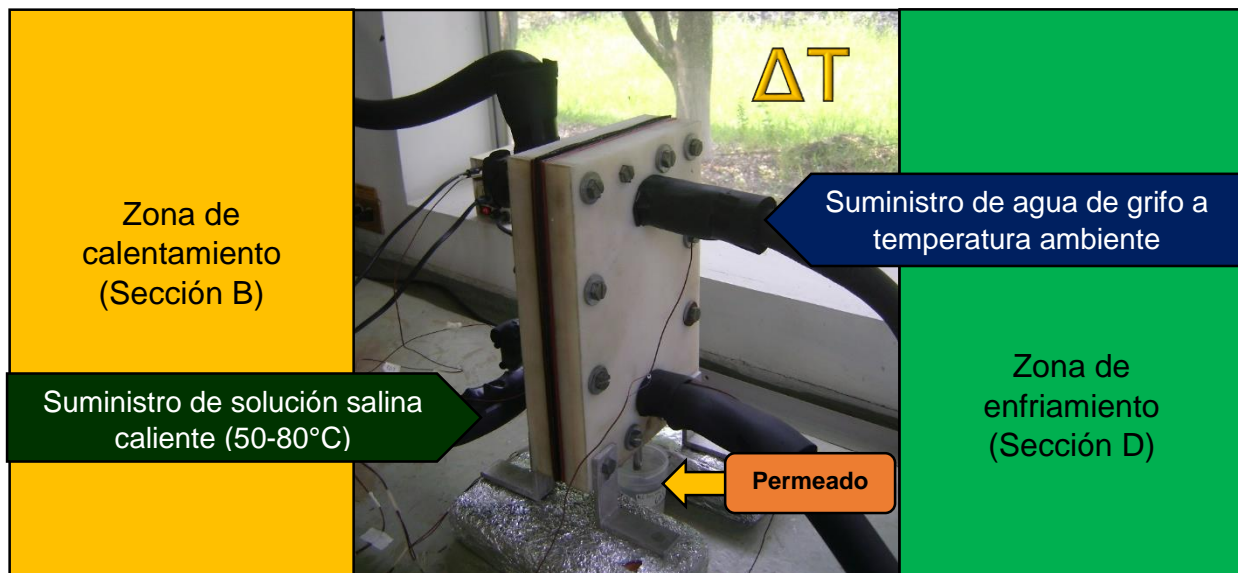


Figura 4.5. Proceso de evaporación-condensación en el interior de la unidad desalinizadora DMEA.

#### 4.4.3 Zona de enfriamiento

La zona de enfriamiento (sección D), está integrada por una bomba hidráulica de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115; dos válvulas de paso marca Foset para

controlar el flujo; un flujómetro de precisión marca IR-Opflow Tipo 2 para medir el flujo; y finalmente, un tanque de almacenamiento de polietileno de 100 L. El objetivo es suministrar agua de grifo a temperatura ambiente a la unidad desalinizadora DMEA para que se lleve a cabo, en el interior de ella, el proceso de condensación.

## 4.5 Instrumentación del sistema desalinizador

Para este trabajo, se realizó la calibración de diez termopares tipo T (cobre-constatan), así como de dos flujómetros Tipo 1 y 2 marca IR-Opflow, con el objeto de controlar y monitorear tanto la temperatura como el flujo. A continuación, se describe a detalle cada uno de los elementos que conforman la instrumentación del sistema desalinizador.

### 4.5.1 Medición de la temperatura

Para medir la temperatura se emplearon diez termopares tipo T (cobre-constatan) calibre 30 con una incertidumbre de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . Para calibrar los termopares se utilizó un termopozo de referencia marca Hort Scientific modelo 9100 S. En la Figura 4.4 se muestra la ubicación de los termopares, mientras que en la Figura 4.6 se muestra la curva de calibración para termopares utilizados. Esta calibración se realizó para cada uno de los termopares descritos, la incertidumbre que se obtiene posterior a la calibración fue de  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ .

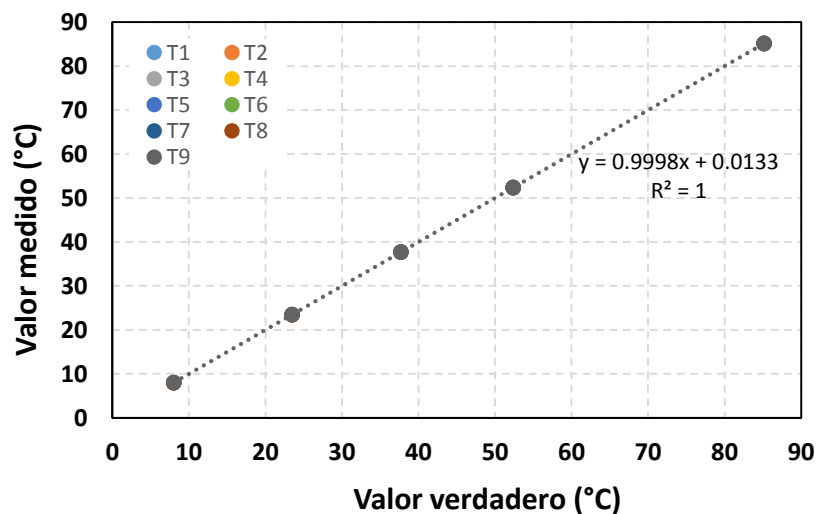


Figura 4.6. Curva de calibración para los termopares utilizados.

### 4.5.2 Control del flujo

En las Figuras 4.7 (a) y 4.7 (b) se muestra la curva de referencia de los flujómetros utilizados para este trabajo. Los flujos de alimentación tanto de la solución salina caliente (flechas amarillas) como la del agua de enfriamiento (flechas rojas, vea Figura 4.4) se impulsaron mediante bombas hidráulicas de recirculación de flujo variable marca Aquapack modelo LOOP3V32-9/1115 y se mantuvieron a un flujo constante de 0.4 L/min, aproximadamente. En ambos casos, el flujo se mide a la salida de la bomba antes de entrar a la unidad DMEA. La medición de los flujos de alimentación de la solución salina caliente se realizó con un flujómetro de precisión Tipo 1 marca IR-Opflow. Para medir el flujo en el canal de enfriamiento se utilizó un flujómetro de precisión Tipo 2 de la misma marca. Ambos flujómetros tienen una incertidumbre de  $\pm 1\%$ .

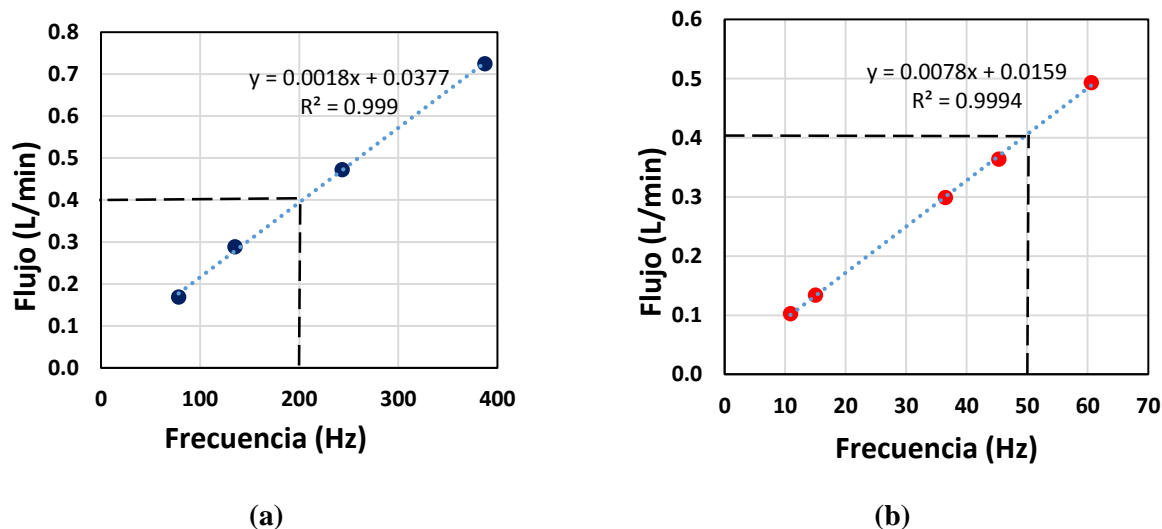
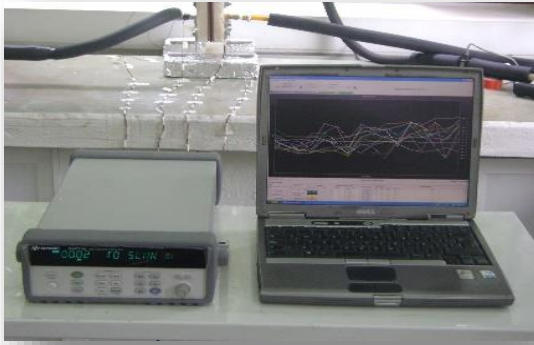


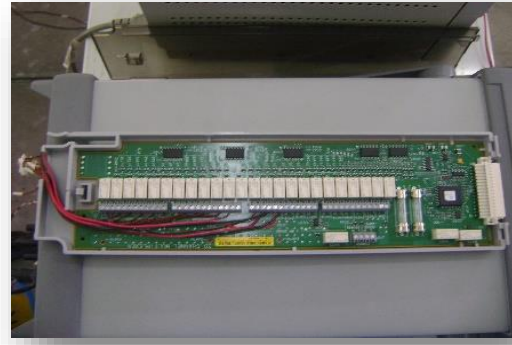
Figura 4.7. Curva de referencia para los flujómetros Tipo 1 (a) y Tipo 2 (b).

### 4.5.3 Sistema de adquisición de datos

Los datos de temperatura y flujo durante las pruebas, fueron monitoreados y almacenados en el sistema de adquisición de datos cada 10 segundos. Para este fin, se utilizó un sistema de adquisición de datos de la marca KEYSIGHT modelo 34970A (Figura 4.8). Para el manejo del adquirente de datos se utilizó un programa desarrollado por Agilent Technology sobre la plataforma BenchLink Data Logger 3 versión 4.3, el cual permite monitorear, almacenar y exportar los datos adquiridos para su procesamiento en hoja de cálculo de Excel.



(a)

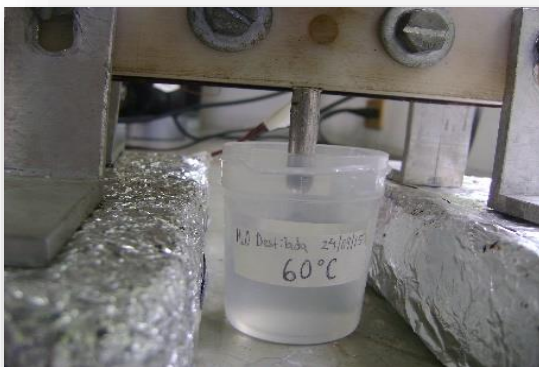


(b)

Figura 4.8. Sistema de adquisición de datos (a) y tarjeta de lectura (b).

#### 4.5.4 Medición del permeado

Para captar el permeado se emplea un vaso de precipitados graduado de polietileno de 100 ml  $\pm$  5%. Sin embargo, para determinar la producción de permeado se utiliza una técnica de gravimetría (Figura 4.9). Para ello se utilizó una balanza granataría marca OHAUS con una incertidumbre de  $\pm 0.5$  g.



(a)



(b)

Figura 4.9. Captación de permeado (a) y técnica gravimétrica (b).

## 4.6 Preparación de las soluciones salinas sintéticas (agua de alimentación)

Las sales utilizadas en este trabajo fueron cloruro de sodio (NaCl) y sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) marca J. T. Baker, con una pureza del 99% y 100%, respectivamente. Estas sales se eligieron con base en la presencia y aporte de iones mayoritarios tanto monovalente como divalentes presentes en el agua marina y/o salobre. Por una parte, aportando cationes de sodio ( $\text{Na}^+$ ) y calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ); y por otro lado, aportando aniones como cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) y sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), respectivamente. En la Tabla 4.1 se muestran las propiedades físicas y químicas de las sales utilizadas para este trabajo, mientras que las características fisicoquímicas de las soluciones salinas sintéticas se muestran en la sección de resultados.

Tabla 4.1. Propiedades físicas y químicas de NaCl y  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Propiedades	NaCl	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Marca	J.T. Baker	J.T. Baker
Pureza	99.9 %	98.0 – 102 %
Número de CAS	7647-14-5	10101-41-4
Apariencia	Cristal	Polvo
Color	Incoloro-Blanco	Blanco
Peso molecular	58.44 g/mol	172.17 g/mol
Densidad	2.16 g/mL	2.32 g/mL
Punto de fusión	801°C	1 450°C
Punto de ebullición	1 465°C	-----
Solubilidad en agua	40 g/100 mL	2.35 g/L

### 4.6.1 Agua salina sintética con NaCl

Se obtuvo una concentración de 5 g/L de NaCl disolviendo 150 g de NaCl en 30 L de agua desionizada; simulando con ello, la presencia del catión sodio (0.217 mol/L  $\text{Na}^+$ ) y del anión cloruro (0.141 mol/L  $\text{Cl}^-$ ), presentes con mayor frecuencia en el agua marina.

### 4.6.2 Agua salina sintética con $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Se obtuvo una concentración de 2 g/L de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  disolviendo 60 g de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en 30 L de agua desionizada; simulando con ello, la presencia del catión calcio (0.05 mol/L  $\text{Ca}^{2+}$ ) y del anión sulfato (0.021 mol/L  $\text{SO}_4^{2-}$ ), presentes con mayor frecuencia en el agua salobre.

### 4.6.3 Agua salina sintética con NaCl + CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O

Se disolvieron 60 g de NaCl y 30 g de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O en 30 L de agua desionizada, obteniendo una concentración de 2 g/L de NaCl y 1 g/L de CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, respectivamente; simulando con ello, la presencia de iones mayores de sodio (0.087 mol/L Na<sup>+</sup>), calcio (0.025 mol/L Ca<sup>2+</sup>), cloruro (0.056 Cl<sup>-</sup>) y sulfato (0.01SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), presentes con mayor frecuencia en el agua marina y/o salobre.

### 4.7 Parámetros de la calidad del agua

En la Tabla 4.2 se muestra la metodología empleada para la determinación de la calidad del agua (análisis fisicoquímicos). Los parámetros de campo como son: SDT, pH, CE y temperatura (T), se midieron in situ con un equipo multiparamétrico marca Thermo-Scientific modelo 339A con una exactitud de ± 0.01. Los análisis descritos anteriormente, se llevaron a cabo tanto para el agua de alimentación (solución salina sintética) y el agua de permeado.

Tabla 4.2. Metodología empleada para la determinación de la calidad de agua (análisis fisicoquímicos).

Parámetro	Metodología	Método
Metales (Na <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> )	NMX-AA-051-SCFI-2001	Espectrometría de absorción atómica
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	NMX-AA-073-SCFI-2001	Titulación o valoración
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	NMX-AA-074-SCFI-2001	Espectrometría
Dureza	NMX-AA-072-SCFI-2001	Titulación o valoración
Alcalinidad	NMX-AA-036-SCFI-2001	Titulación o valoración
Carbono Orgánico Total (COT)	Método 5310B “Carbono Orgánico Total (COT)” APHA (1995)	Oxidación: Método de combustión de alta temperatura.

### 4.8 Parámetros térmicos

Para evaluar la unidad DMEA se utilizaron ciertos parámetros que a menudo son empleado para evaluar sistemas térmicos, los cuales son: la razón de ganancia a la salida (GOR), El consumo de energía específico (EC), la razón de recuperación (RR) y cociente de desempeño (PR). El GOR se define como la cantidad de energía térmica requerida idealmente para evaporar la masa del



permeado obtenido, respecto a la cantidad de energía realmente suministrada al sistema para lograrlo. El GOR se expresa como:

$$GOR = \frac{m_d h_{fg}}{Q_{in}} \quad (4.1)$$

Donde  $m_d$  es el flujo de masa del permeado,  $h_{fg}$  la entalpía específica de vaporización a la temperatura que ocurre el proceso, y  $Q_{in}$  es la entalpía externa suministrada asociada a la corriente de alimentación. Nótese que en un sistema donde haya recuperación y reutilización de calor en varias etapas, el GOR puede llegar a ser mayor a la unidad.

El EC se define como la relación que existe entre el flujo de permeado y la potencia suministrada al sistema desalinizador. La EC se expresa como:

$$EC = \frac{Q_{in}}{m_d} \quad (4.2)$$

Ambos parámetros (GOR y EC), proporcionan información sobre el rendimiento térmico del sistema.

El RR se define como el porcentaje de la masa de permeado obtenido del total de la solución que ingresa al sistema. El RR se calcula por medio de la siguiente relación:

$$RR = \frac{m_d}{m_{in}} \times 100 \quad (4.3)$$

Donde  $m_d$  el flujo másico del permeado obtenido y  $m_{in}$  es el flujo másico de la corriente principal que ingresa al sistema.

El PR es un parámetro que relaciona la producción de permeado con el calor que ingresa al sistema. Se define como es flujo másico del permeado dividido entre la cantidad de energía térmica suministrada al sistemas.

$$PR = \frac{m_d}{Q_{in}} \quad (4.4)$$

Un valor de PR alto indica que se obtiene una producción mayor de permeado por unidad de energía térmica suministrada.



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de un prototipo experimental de una unidad desalinizadora DMEA. En primer lugar se presentan los resultados de la producción de permeado en función de la temperatura de alimentación, así como los resultados de la calidad del agua de alimentación y del agua de permeado al emplear membranas hidrófobas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ . La Calidad del agua de alimentación y del agua de permeado se comparó la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el año 2000) y, posteriormente, se realizó su clasificación de acuerdo a su salinidad, alcalinidad y dureza. Por último, se determinó el consumo energético y el desempeño térmico del sistema desalinizador.

### 5.1 Evaluación de la producción de permeado

En las Tablas 5.1 y 5.2 se muestran los promedios de los flujos y de las temperaturas de alimentación en ambos canales, así como su respectiva desviación estándar al emplear membranas de PTFE y PVDF. En cada una de las pruebas la temperatura de alimentación estuvo muy cerca del valor nominal y el flujo de alimentación ligeramente bajo en ambos casos.

Tabla 5.1. Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PTFE de 0.45  $\mu\text{m}$

Agua de alimentación	Temperatura de alimentación ( $^{\circ}\text{C}$ )				Flujo de alimentación (L/min)	
	50	60	70	80	Calentamiento	Enfriamiento
Blanco	50.2 $\pm$ 0.2	60.2 $\pm$ 0.2	70.2 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.2	0.42 $\pm$ 0.02	0.42 $\pm$ 0.02
NaCl	50.3 $\pm$ 0.1	60.3 $\pm$ 0.2	70.3 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.1	0.42 $\pm$ 0.02	0.42 $\pm$ 0.02
CaSO <sub>4</sub>	50.3 $\pm$ 0.2	60.3 $\pm$ 0.1	70.3 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.2	0.41 $\pm$ 0.02	0.41 $\pm$ 0.02
NaCl + CaSO <sub>4</sub>	50.3 $\pm$ 0.2	60.3 $\pm$ 0.2	70.3 $\pm$ 0.2	80.3 $\pm$ 0.2	0.43 $\pm$ 0.01	0.43 $\pm$ 0.01

Tabla 5.2. Promedios y desviaciones estándar empleando membranas de PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$

Agua de alimentación	Temperatura de alimentación ( $^{\circ}\text{C}$ )				Flujo de alimentación (L/min)	
	50	60	70	80	Calentamiento	Enfriamiento
Blanco	50.1 $\pm$ 0.1	60.1 $\pm$ 0.1	70.1 $\pm$ 0.1	80.1 $\pm$ 0.1	0.40 $\pm$ 0.01	0.42 $\pm$ 0.01
NaCl	50.2 $\pm$ 0.2	60.2 $\pm$ 0.2	70.2 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.2	0.42 $\pm$ 0.02	0.42 $\pm$ 0.02
CaSO <sub>4</sub>	50.2 $\pm$ 0.2	60.2 $\pm$ 0.2	70.2 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.2	0.41 $\pm$ 0.02	0.41 $\pm$ 0.02
NaCl + CaSO <sub>4</sub>	50.2 $\pm$ 0.2	60.2 $\pm$ 0.2	70.2 $\pm$ 0.2	80.2 $\pm$ 0.2	0.43 $\pm$ 0.01	0.43 $\pm$ 0.01

En las Figuras 5.1 y 5.2 se muestra la producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para la membrana de PTFE y PVDF, respectivamente. Se observa que al aumentar la temperatura de alimentación la producción de permeado también aumenta, esto debido a que al incrementar la temperatura la energía cinética de las moléculas de vapor de agua es mayor, por lo tanto habrá un mayor flujo de vapor y por ende se generará una mayor producción de permeado. Lo anterior concuerda con los estudios realizados por Alkudhiri *et al.*, 2012 b y 2013 a-b. En ambas membranas se logra ver este comportamiento. Sin embargo, a pesar de que tienen el mismo tamaño de poro, se aprecia una mayor producción de permeado con las membranas de PTFE respecto a las membranas de PVDF. Esto se le puede atribuir a los procesos de fabricación y a las propiedades intrínsecas de cada membrana como: la composición, el espesor, la porosidad, la hidrofobicidad y la tortuosidad de cada membrana.

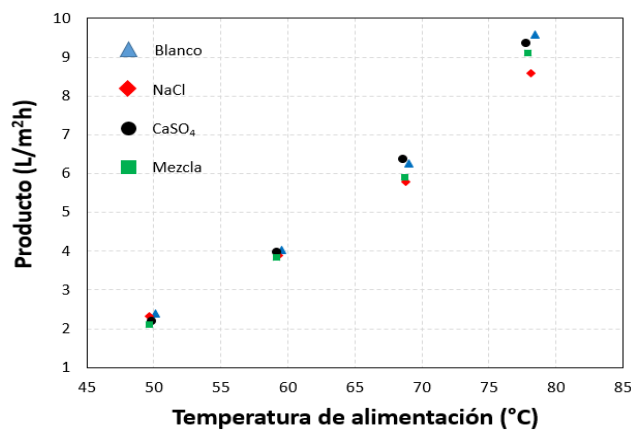


Figura 5.1. Producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para una membrana de PTFE.

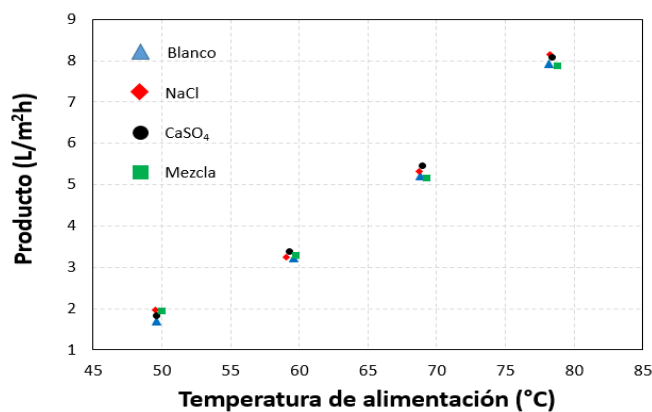


Figura 5.2. Producción de permeado como función de la temperatura de alimentación para una membrana de PVDF.

En la sección 3.4 se argumentó que la diferencia de temperatura promedio entre los canales de alimentación representa la fuerza impulsora efectiva del proceso DM. Una manera de visualizar lo anterior es graficando la producción de permeado como función de esta diferencia de temperatura. La Figura 5.3 muestra el comportamiento del volumen del permeado en función de la diferencia promedio de temperatura entre ambos canales de alimentación. En la figura,  $T_H$  representa la temperatura promedio de la entrada y la salida del canal de calentamiento y  $T_C$  la temperatura promedio del canal de enfriamiento. Claramente el volumen del permeado es mayor cuando la diferencia de temperatura es mayor, ya que tanto la difusión térmica como la difusión de concentración son favorecidas.

Por otro lado, como se discutió en la sección 3.2 la evaporación del agua en presencia de aire puede describirse utilizando la ecuación de Antoine (Ec 3.2). Esta ecuación que se deriva de la ecuación de Clausius–Clapeyron es de tipo exponencial. Una de las consideraciones en la DMEA es que la membrana no afecta el equilibrio líquido-vapor. Por lo tanto, la producción de permeado también debería presentar comportamiento de este tipo como una función de la temperatura de alimentación. En la Figura 5.3 las líneas discontinuas representan un ajuste de tipo exponencial. Se observa que la producción de permeado tiene una tendencia de este tipo, alcanzando un máximo a 80°C. Este comportamiento en la producción de permeado ha sido reportado por otros autores Dehesa *et al.* (2013), Banat *et al.* (1998) e Izquierdo-Gil *et al.* (1999).

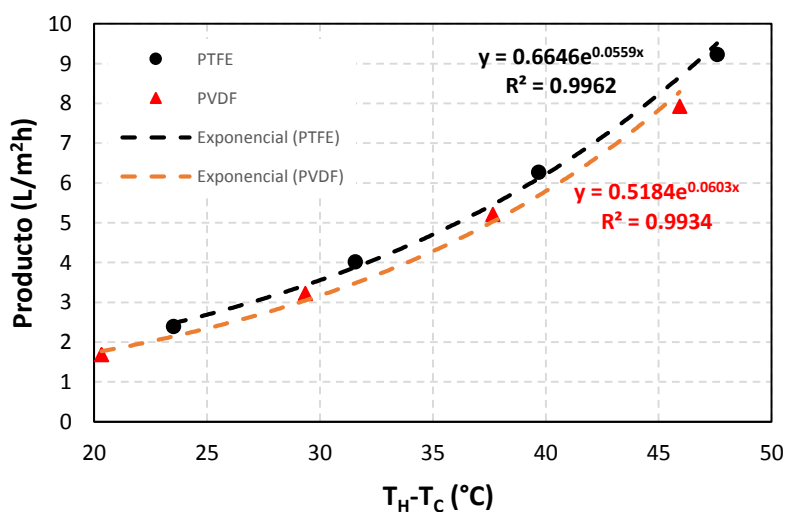


Figura 5.3. Producción de permeado como función de la diferencia de temperatura de alimentación en membranas de PTFE y PVDF.

## 5.2 Temperatura de enfriamiento y efectos en la producción de permeado

Durante las pruebas realizadas la temperatura en el canal de enfriamiento fue un parámetro libre que dependía de las condiciones atmosféricas. A lo largo de las pruebas, la temperatura a la entrada del canal de enfriamiento sufrió un cambio de 26.0°C a 35.0°C. De acuerdo con Alkudhiri *et al.* (2012) los efectos de la temperatura, en el canal de enfriamiento, sobre la producción de permeado son pequeños. Por ejemplo, los autores reportan una disminución del 6% en la producción del permeado al pasar de 5°C a 20°C manteniendo constante la temperatura de alimentación. Las Figuras 5.4 y 5.5 muestran la producción de permeado como función de la diferencia de temperatura entre el canal de alimentación y de enfriamiento para una membrana de PTFE y PVDF, respectivamente. Como se ha descrito previamente la temperatura de alimentación se mantuvo en un valor constante. Sin embargo, la temperatura de enfriamiento no, eso explica la dispersión de los datos. En la gráfica los datos están agrupados como función de la temperatura de alimentación 50, 60, 70 y 80 °C de abajo hacia arriba. Se puede observar que en algunos de los caso la diferencia de temperatura, entre una prueba y otra, es muy cercana a los 9°C. Sin embargo, no se observó un incremento en la producción de permeado. Esto es muy similar a lo reportado previamente por Alkudhiri *et al.* (2012). Para el caso de la membrana de PVDF los resultados son similares. La dispersión de los datos es menor porque las condiciones atmosféricas fueron similares durante la realización de estas pruebas (Figura 5.5).

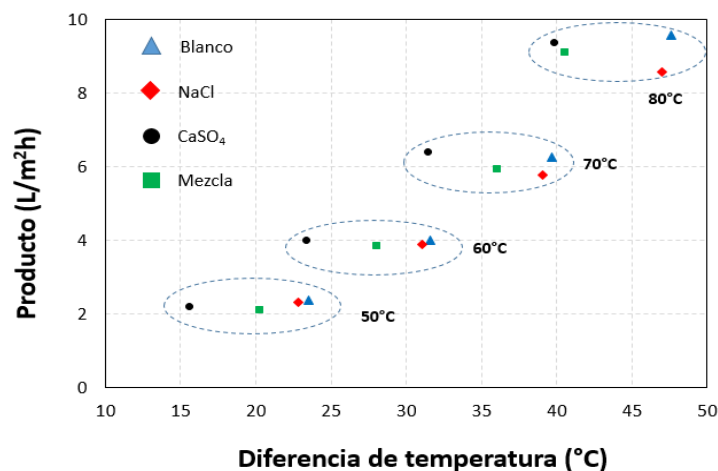


Figura 5.4. Efecto de la producción de permeado como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para una membrana de PTFE.

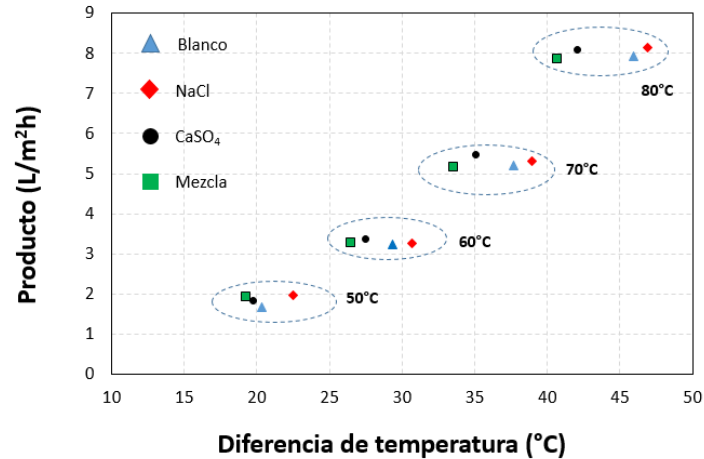


Figura 5.5. Efecto de la producción de permeado como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para una membrana de PVDF.

### 5.3 Determinación del consumo energético

Se evaluaron varios flujos de calor en el sistema, tomando como base las mediciones de las temperaturas y los caudales de alimentación. En primer lugar se determinó el consumo de energía por el proceso, basado en la disminución de la temperatura del flujo de alimentación.

$$Q_{in} = m_H cp(T_{H,in} - T_{H,out}) \quad (5.1)$$

Estrictamente hablando, el flujo de masa en el canal caliente ( $m_H$ ) no es una constante. Una fracción se convierte en vapor de agua que pasa a través de la membrana y que posteriormente se convierte en permeado. Sin embargo, la producción de permeado es muy pequeña en comparación con el caudal de alimentación ( $m_{dis} \ll m_H$ ). Por lo tanto, el flujo de masa  $m_H$  en la ecuación 5.1 se puede considerar constante. La recuperación de calor, basada en el aumento de la temperatura en el lado de enfriamiento puede expresarse de manera similar como:

$$Q_C = m_C cp(T_{C,in} - T_{C,out}) \quad (5.2)$$

La diferencia entre  $Q_H - Q_C$  es la cantidad de calor que se pierde a través de las paredes laterales o como calor sensible. El flujo de calor neto que se transfiere del canal de alimentación al canal de enfriamiento se lleva a cabo por dos mecanismos como se ha explicado anteriormente: calor latente del vapor de condensación y calor sensible transferido por conducción a través del espacio de aire.

El calor latente se evalúa con base al volumen de permeado y la temperatura a la cual ocurre el proceso, se expresa como:

$$Q_{des} = m_{des} * h_{fg}(T_H) \tag{5.2}$$

Donde  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización del agua. La transferencia de calor sensible entre el lado frío y el lado caliente, a través del espaciado de aire, se puede obtener como la diferencia entre el calor recuperado en el lado frío y el calor latente. Desde el punto de vista de nuestro proceso se trata de una transferencia calor parásito porque no contribuye en la producción de permeado.

La Figura 5.6 muestra el porcentaje de contribuciones del flujo de calor asociado con la producción de permeado (calor latente) y con la transferencia de calor parásita (calor sensible), respectivamente. En la gráfica se observa que el consumo de calor suministrado para producir permeado oscila entre el 77.39 % y el 49.35 %, mientras que en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4% se transfiere como calor sensible. Por otra parte, las pérdidas representan en promedio alrededor de 21.8%.

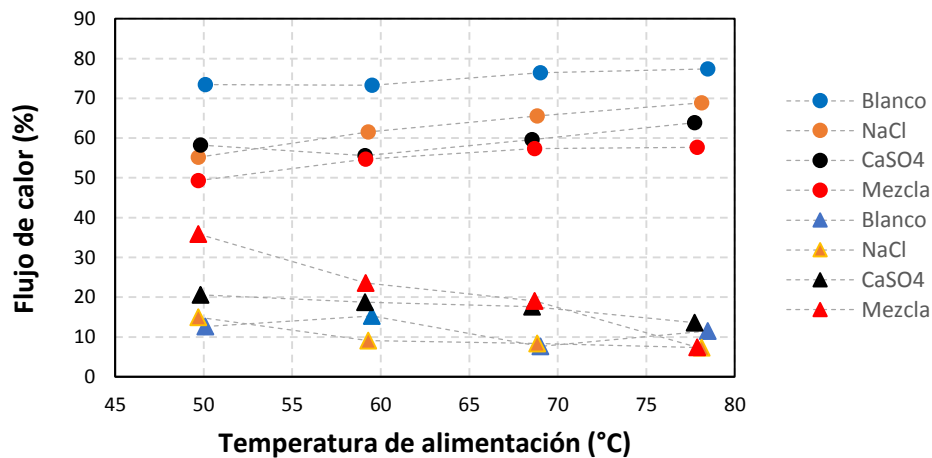


Figura 5.6. Flujo de calor latente y sensible asociados con la producción de permeado para una membrana de PTFE.

Para el caso de la membrana de PVDF representada en la Figura 5.7, se observó que la contribución del calor sensible disminuye ligeramente con la temperatura de suministro. Sin embargo, la contribución por calor latente aumenta cuando la temperatura de alimentación es mayor. Por

ejemplo, cuando la temperatura de alimentación es de 50°C, en promedio el 55.15% de la energía recuperada en el lado de refrigeración se transfiere como calor latente, mientras que el calor sensible representa en promedio el 18.24 %. Sin embargo, cuando la temperatura de alimentación es de 80°C, la contribución por calor latente representa en promedio el 69.89% mientras que el calor sensible disminuye a un valor de 12.51%. Por lo tanto, el sistema no sólo produce más permeados a temperaturas más altas, sino que también disminuye la transferencia de calor parasita.

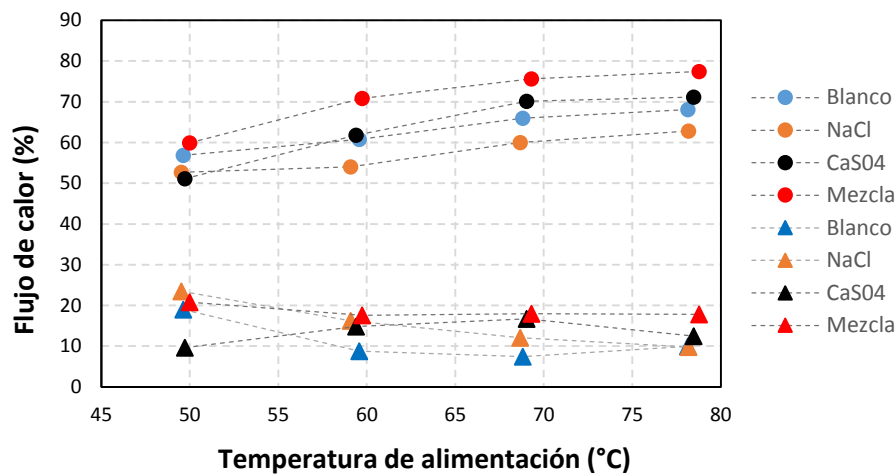


Figura 5.7. Flujo de calor latente y sensible asociados con la producción de permeado para una membrana de PVDF.

Por otra parte, existen cuatro indicadores que son utilizados evaluar el desempeño un sistema térmico. Estos indicadores son el GOR, EC, el PR y el RR. Los dos primeros indicadores proporcionan información sobre el rendimiento térmico del proceso. Mientras que los segundos, proporcionan información sobre la efectividad del proceso. Una vez determinadas las cargas se evaluaron los parámetros descritos en la sección 4.3. En la gráfica de la Figura 5.8 se muestran los valores del GOR para la unidad evaluada. En términos generales, el GOR nos indica que el sistema utiliza cerca del 0.7 por cada unidad de energía suministrada, la diferencia restante representan las pérdida e irreversibilidades del proceso. Los sistemas con recuperación de calor pueden obtener valores del GOR promedio cercanos a 6.5 (Koschikowski *et al.*, 2003).

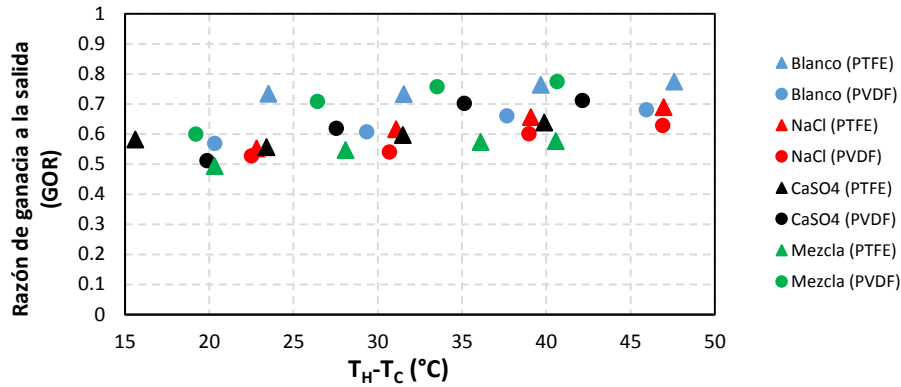


Figura 5.8. Razón de ganancia a la salida (GOR) como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.

Por otra parte, el EC es un indicador que a menudo es utilizado en sistemas eléctricos y nos indica la potencia necesaria para producir un volumen de producto. La grafica de la Figura 5.9 muestra el consumo energético del sistema evaluado. Hay que tener en cuenta que el consumo del sistema es térmico y no eléctrico, por esta razón no es posible realizar una comparación directa con sistemas de OI o NF. El consumo del sistema da la impresión de ser muy elevado, sin embargo, recordemos que el principio de separación de la DMEA es mediante cambio de fase. Como se muestra con el GOR, en promedio el 70% de la energía que se consume es empleada para realizar el cambio de fase. Para reducir el consumo, se deben utilizar sistemas que operen con recuperación de calor. Es decir que el calor de cambio de fase pueda re-introducirse al sistema y con ello aumentar el rendimiento.

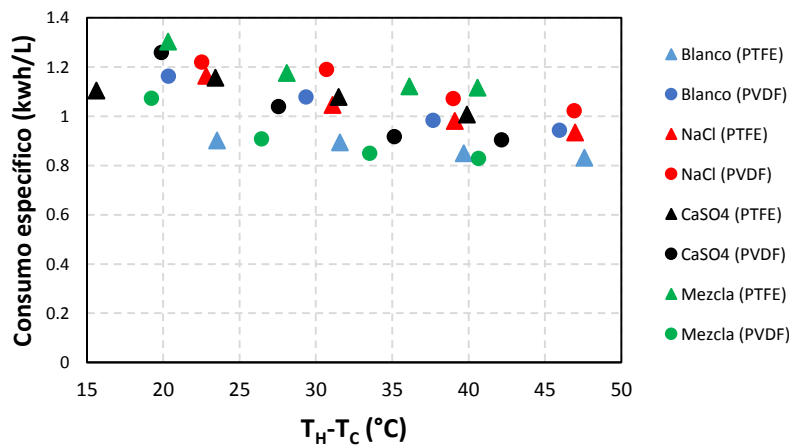


Figura 5.9. Consumo específico (EC) como función de las diferencia de temperaturas entre ambos canales de alimentación para ambas membranas.



En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de evaluar los indicadores RR y PR. Se observa que la tasa de recuperación de permeado es muy pequeña inferior al 1% en ambos casos. El área efectiva de la membrana es pequeña 144 cm<sup>2</sup> un área mayor implica mayor producción de permeado. En la misma tabla se observa valores de PR muy bajos, un valor de PR alto indica que se obtiene una producción mayor de permeado por unidad de energía térmica suministrada.

Tabla 5.3. Resultados de evaluar los indicadores RR y PR

		PTFE			PVDF		
		$\Delta T$ (°C)	RR (%)	PR (L/m <sup>2</sup> h)	$\Delta T$ (°C)	RR (%)	PR (L/m <sup>2</sup> h)
Blanco	50	23.5	0.1	0.077	20.3	0.1	0.060
	60	31.6	0.2	0.078	29.3	0.2	0.064
	70	39.7	0.4	0.082	37.7	0.3	0.071
	80	47.6	0.5	0.084	45.9	0.5	0.074
NaCl	50	22.8	0.1	0.060	22.5	0.1	0.057
	60	31.1	0.2	0.066	30.7	0.2	0.058
	70	39.1	0.3	0.071	39.0	0.3	0.065
	80	47.0	0.5	0.074	46.9	0.5	0.068
CaSO <sub>4</sub>	50	15.6	0.1	0.063	19.9	0.1	0.055
	60	23.4	0.2	0.060	27.5	0.2	0.067
	70	31.5	0.4	0.064	35.1	0.3	0.076
	80	39.9	0.6	0.069	42.1	0.5	0.077
Mezcla	50	20.3	0.1	0.053	19.2	0.1	0.065
	60	28.1	0.2	0.059	26.4	0.2	0.076
	70	36.1	0.3	0.062	33.5	0.3	0.082
	80	40.6	0.5	0.062	40.6	0.4	0.084

## 5.4 Evaluación del flujo de sal

Las condiciones iniciales del blanco (agua destilada) fueron: 27°C, 0.060  $\mu$ S/cm, 0.030 mg/L y 6.5 unidades de pH, respectivamente. Los resultados muestran que los permeados obtenidos a 50°C y 60°C tienen una calidad de agua similar al agua desionizada utilizada como blanco. Los permeados obtenidos a 70°C y 80°C superan ligeramente la calidad del agua desionizada, la cual es utilizada en el laboratorio para lavado de material y preparación de soluciones. Es claro que las membranas evaluadas no impiden en su totalidad el flujo de sal. De hecho, una fracción muy pequeña de las sales disueltas en el canal de alimentación logra atravesar la membrana y alojarse en el permeado. La disminución aparente de la salinidad al aumentar la temperatura creemos que está asociada a la

relación que existe entre la transferencia de vapor y la tasa de transferencia de sal a través de la membrana. A medida que aumenta la temperatura de alimentación, la cantidad de vapor de agua es mayor comparado con la tasa de transferencia de sal, dando como resultado una salinidad más baja. Cuando se grafican los resultados de SDT en términos de la razón de masa (g/min), se observa que el flujo de sal también aumenta con la temperatura, como sucede con el flujo de permeado. Sin embargo, este incremento es menor en relación al incremento en la producción de permeado. La Figura 5.10 muestra el incremento del flujo de sal como función de la temperatura de alimentación.

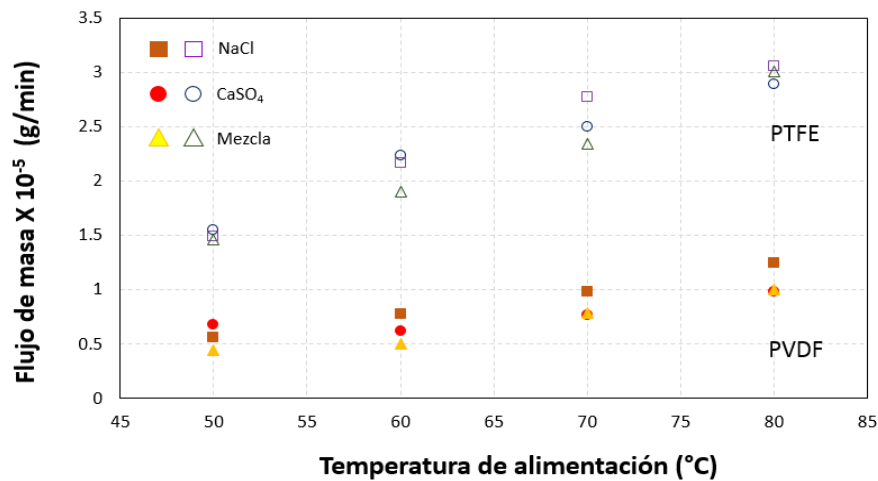


Figura 5.10. Flujo de masa de sal a través de la membrana de PTFE y PVDF.

Derivado de la observaciones en la producción de permeado y la gráfica de la Figura 5.10 se puede observar las membranas de PVDF producen menor cantidad de permeado pero mayor calidad del producto respecto al producto obtenido con las membrana de PTFE. Las Tablas 5.4 a 5.6 presentan los valores de las mediciones realizadas obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación.

Tabla 5.4. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl

Permeado	*T (°C)		CE (µS/cm)		SDT (mg/L)		pH (unidades)	
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.5	27.4	0.055	0.019	0.028	0.014	6.5	6.5
60°C	27.5	27.4	0.056	0.015	0.024	0.008	6.5	6.5
70°C	27.4	27.3	0.036	0.011	0.018	0.006	6.5	6.5
80°C	27.4	27.3	0.027	0.010	0.011	0.005	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

Tabla 5.5. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación, empleando como agua de alimentación 2 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Permeado	*T (°C)		CE (μS/cm)		SDT (mg/L)		pH (unidades)	
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.4	27.3	0.031	0.023	0.016	0.011	6.5	6.5
60°C	27.5	27.4	0.024	0.021	0.014	0.010	6.5	6.5
70°C	27.3	27.0	0.026	0.020	0.012	0.009	6.5	6.5
80°C	27.3	27.1	0.025	0.017	0.011	0.008	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

Tabla 5.6. Calidad del agua de permeados obtenidos a diferentes temperaturas de alimentación empleando como agua de alimentación 2 g/L de NaCl + 1 g/L de CaSO<sub>4</sub>.

Permeado	*T (°C)		CE (μS/cm)		SDT (mg/L)		pH (unidades)	
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF
50°C	27.2	27.4	0.024	0.016	0.012	0.008	6.5	6.5
60°C	27.5	27.1	0.017	0.014	0.010	0.007	6.5	6.5
70°C	27.4	27.1	0.016	0.012	0.009	0.006	6.5	6.5
80°C	27.0	27.3	0.015	0.010	0.008	0.005	6.5	6.5

\*Temperatura interna de la muestra a la hora de la toma de lectura.

## 5.5 Evaluación de la calidad del agua

Las pruebas experimentales para la determinación de la calidad del agua fueron de 8 horas continuas a una temperatura de operación de 80°C, a partir del estado estacionario. Esto con la finalidad de obtener aproximadamente 1000 mL de muestra de permeado en cada prueba y poder realizar los respectivos parámetros fisicoquímicos establecidos en la metodología indicada en esta tesis. Se tomaron muestras del influente (agua de alimentación) y del efluente (permeado). Las muestras se tomaron al inicio (0 horas), a la mitad (4 horas) y al final de la prueba (8 horas). Durante las pruebas experimentales se controló la temperatura y el flujo de alimentación de la zona de calentamiento y de enfriamiento. Los promedios de la temperatura de alimentación y de enfriamiento fueron de  $80.2 \pm 0.2^\circ\text{C}$  y  $25.5 \pm 2.0^\circ\text{C}$ , mientras que los promedios de los flujos de alimentación de la zona de calentamiento y de enfriamiento fueron de  $0.42 \pm 0.20$  y  $0.43 \pm 0.20$  L/min, respectivamente.

Se realizó una comparación de la calidad del agua de alimentación y del agua de permeado con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Esta norma establece los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano, así como los tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Cabe mencionar que sólo se tomaron algunos parámetros químicos inorgánicos de referencia relacionados a la calidad del agua con alto contenido de sales, ya que para cumplir totalmente con esta norma también se debe de cumplir con las características bacteriológicas, radiactivas, físicas y organolépticas, así como los constituyentes químicos orgánicos establecidos en dicha norma. En las Tablas 5.7 a 5.9 se muestran los resultados de la calidad de agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF, utilizando como agua de alimentación soluciones salinas sintéticas de NaCl y CaSO<sub>4</sub>, así como una mezcla de ambas sales.

Tabla 5.7. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm, utilizando como agua de alimentación 5 g/L de NaCl.

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP*
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	
<sup>o</sup> CE (µS/cm)	8 978	9 864	10 240	10 570	10 406	10 628	32	50	28	44	-----
SDT (mg/L)	4 489	4 932	5 120	5 285	5 203	5 314	16	25	14	22	<b>1 000</b>
Na <sup>+</sup> (mg/L)	1 378	2 372	1 530	2 208	1 538	2 179	0.02	0.05	0.0	0.0	<b>200</b>
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	416	262	1 269	255	1 306	234	0.1	0.1	0.0	0.0	<b>250</b>
<sup>o</sup> Alcalinidad (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	4.13	4.13	3.72	3.72	3.93	3.93	3.82	3.82	3.93	4.11	-----
Dureza Total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	8.62	8.62	13.1	13.1	14.9	14.9	4.31	5.11	5.11	4.31	<b>500</b>
pH (unidades)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
<sup>o</sup> Tempe. (°C)	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
<sup>o</sup> COT (mg/L)	0.74	1.71	1.86	1.96	2.41	2.26	1.62	2.76	1.65	2.61	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto no cuentan con un valor de referencia.

Tabla 5.8. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ , utilizando como agua de alimentación 2 g/L de  $\text{CaSO}_4$ .

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP*
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	
*CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	3 624	3 484	3 706	3 842	3 730	3 948	40	32.8	36	28	-----
SDT (mg/L)	1 812	1 742	1 853	1 921	1 865	1 974	20	16.4	18	14	<b>1 000</b>
* $\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	471	476	468	495	504	515	0.14	0.23	0.07	0.23	-----
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	1 269	996	1 239	1 090	1 786	1 168	4.87	1.65	4.04	0.04	<b>400</b>
*Alcalinidad (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	7.30	3.77	8.58	10.1	7.23	9.85	10.1	5.99	9.26	4.86	-----
Dureza Total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	1 145	1 935	1 174	1 202	1 200	1 282	1.57	2.55	2.16	2.16	<b>500</b>
pH (unidades)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
*Tempe. ( $^{\circ}\text{C}$ )	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
*COT (mg/L)	0.94	1.85	1.21	1.58	2.37	2.69	2.12	2.22	1.35	2.27	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto no cuentan con un valor de referencia.

Tabla 5.9. Calidad del agua de alimentación y del permeado empleado membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$ , utilizando como agua de alimentación 2 g/L de  $\text{NaCl}$  + 1 g/L de  $\text{CaSO}_4$ .

Parámetro	Agua de alimentación						Permeado				NOM-127 LMP*
	0 horas		4 horas		8 horas		4 horas		8 horas		
	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	PTFE	PVDF	
*CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	5 852	5 792	6 090	6 276	6 358	6 270	64	10.4	64	8.0	-----
SDT (mg/L)	2 926	2 896	3 045	3 138	3 179	3 135	32	5.2	32	4.0	<b>1 000</b>
$\text{Na}^+$ (mg/L)	629	655	645	661	666	690	0.2	0.9	0.1	0.4	<b>200</b>
$\text{Cl}^-$ (mg/L)	373	369	438	1 354	535	1 025	0.54	0.0	0.0	0.0	<b>250</b>
* $\text{Ca}^{2+}$ (mg/L)	215	233	231	242	215	240	2.64	0.11	2.16	0.11	-----
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)	595	602	625	623	626	603	0.45	0.42	0.0	0.16	<b>400</b>
*Alcalinidad (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	5.31	5.99	4.86	6.20	7.85	8.89	2.17	2.82	3.72	3.75	-----
Dureza Total (mg/L $\text{CaCO}_3$ )	609	369	624	1 354	645	1 025	2.74	0.0	3.59	0.0	<b>500</b>
pH (unidades)	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	6.5	6.5	6.5	6.5	<b>6.5-8.5</b>
*Tempe. ( $^{\circ}\text{C}$ )	23.2	23.2	23.4	23.4	23.3	23.3	23.1	23.1	23.2	23.2	-----
*COT (mg/L)	0.90	0.85	2.82	1.99	2.43	2.30	2.02	2.76	2.41	2.30	-----

\*Parámetros que no se encuentran registrados en la norma, por lo tanto no cuentan con un valor de referencia.

Como es de esperarse, los resultados muestran que la calidad del agua de las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación sobrepasan los LMP establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Por el contrario, el agua de permeado de estos tres influentes cumple parcialmente con los LMP establecidos en esta norma. Sin embargo, para compensar el bajo aporte de aniones y cationes o la ausencia de ellos, esta agua puede ser remineralizada agregándole sales o mezclándola con el agua de rechazo del propio sistema desalinizador.

### Salinidad

Los resultados muestran un incremento de la salinidad expresada como SDT en las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación a partir de las 4 horas continuas de prueba, continuando con este comportamiento hasta el final de las pruebas experimentales (8 horas). Este incremento de la salinidad se debe a la transferencia de vapor de agua dentro de la unidad DMEA y a las pérdidas de masa al ambiente en forma de vapor. Sin embargo, este incremento no afecta de manera significativa la producción de permeado. De acuerdo con Alkudhiri, *et al.* (2013b) la disminución en la producción de permeado, por efecto del incremento de la salinidad en concentraciones inferiores a 40 g/L de SDT, es muy pequeña. Estos autores estimaron que la reducción de permeado sea del orden de 0.03 kg/m<sup>3</sup>h en un rango de 0 a 40 g/L de SDT. Bajo este contexto, se decidió recircular el agua de rechazo para seguir alimentando la unidad DMEA, tal y como se muestra en la metodología del capítulo 3 de esta tesis (Figura 4.4). Por su salinidad, las soluciones salinas utilizadas como agua de alimentación se encuentran dentro de la categoría de agua salobre y marina (APHA, 1995a), reportados a través del valor de la CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y por medio de la concentración de SDT (mg/L). La calidad del agua de estos influentes sobrepasa el valor de SDT (1 000 mg/L) establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

Los resultados muestran una mejora en la calidad del agua de los permeados, obteniendo una disminución de la salinidad del 99.6% y 99.8 % a las 4 y 8 horas continuas de prueba, respectivamente. El valor de la CE no se encuentra reportado en la NOM-127-SSA1-1994. Sin embargo, el agua de permeado cumple con los LMP establecidos para la concentración de SDT, obteniendo valores por debajo de lo establecido en dicha norma (1 000 mg/L de SDT). Por su baja salinidad, La calidad del agua de los permeados se clasifica en la categoría de agua potable (APHA,

1995-a). En la Tabla 5.10 se muestra la clasificación del agua de alimentación y del agua de permeado por su salinidad con base a lo propuesto por APHA (1995a).

Tabla 5.10. Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su salinidad (APHA, 1995a)

Clasificación	Agua de alimentación			Permeados		
	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>
CE (μS/cm)	AM	AS	AM	AP	AP	AP
SDT (mg/L)	AS	AS	AS	AP	AP	AP

AM= Agua Marina (5 000-45 000 μS/cm; 10 000-100 000 mg/L)

AS= Agua Salobre (2 000-5 000 μS/cm; 1 000-10 000 mg/L)

AP= Agua Potable (100-2 000 μS/cm; 0-1 000 mg/L)

### Aniones y Cationes

Las soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación están compuestas por sales de NaCl y CaSO<sub>4</sub>. Por lo anterior, se determinaron las concentraciones de los iones de sodio (Na<sup>+</sup>), calcio (Ca<sup>2+</sup>), cloruros (Cl<sup>-</sup>) y sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Al igual que la salinidad, la concentración de aniones y cationes tiende a incrementar en el agua de alimentación a partir de las 4 horas continuas de prueba continuando con este comportamiento hasta el final de las pruebas experimentales (8 horas). El incremento de la concentración de estos iones en el termostato de alimentación que abastece a la unidad DMEA, se debe principalmente a su rechazo por parte de las membranas hidrófobas de PTFE y PVDF de 0.45 μm y a las pérdidas de agua en forma de vapor por difusión dentro de la unidad DMEA. Esta concentración se ve reflejada en los resultados obtenidos, rebasando los LMP para uso y consumo humano (NOM-127-SSA1-1994). Los resultados muestran una mejora en la calidad del agua de los permeados, obteniendo una disminución de la concentración de aniones y cationes del 99.7% y del 100% a las 4 horas y 8 horas continuas de prueba, respectivamente, cumpliendo con los LMP establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

### Alcalinidad y Dureza Total

Las tres soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación presentan una alcalinidad baja. Esto debido a la ausencia de sales de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos en su composición, los cuales contribuyen a una baja alcalinidad (Kemmer, 1989). Estas tres soluciones salinas presentan una dureza alta, debido al aporte del catión calcio (Ca<sup>2+</sup>) proveniente de la sal de CaSO<sub>4</sub>, colocándolas en la clasificación de aguas muy duras a excepción de la solución de NaCl, la cual no contiene sales de calcio ni magnesio, clasificándola en una solución blanda (Kiely, 1999).

En la Tabla 5.11 se muestra la clasificación del agua de alimentación y del agua de permeado por su alcalinidad y dureza total con base a lo propuesto por Kemmer (1989) y Kiely (1999).

Tabla 5.11. Clasificación del agua de alimentación y de permeado por su dureza y alcalinidad total.

Clasificación	Agua de alimentación			Permeados		
	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>	NaCl	CaSO <sub>4</sub>	NaCl + CaSO <sub>4</sub>
AT (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Baja
DT (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Blanda	Muy dura	Muy dura	Blanda	Blanda	Blanda

*DT= Dureza Total (Blanda 0-75; moderadamente dura 75-150; Dura 150-300; Muy dura >300 mg/L CaCO<sub>3</sub>)*

*AT= Alcalinidad Total (Baja <75; Media 75-150; Alta >150 mg/L CaCO<sub>3</sub>)*

### pH y Temperatura

La temperatura no tuvo una variación significativa. El valor de pH disminuyó de 7.5 en el agua de alimentación a 6.5 en el agua de permeado. Esta disminución de una unidad logarítmica de pH se da por el rechazo de iones por parte de las membranas utilizadas provocando la ausencia de aniones y cationes en el agua de permeado.

### Carbono Orgánico Total

El COT es una medida indirecta para medir la presencia o ausencia de materia orgánica presente en el agua. Se obtiene a partir de la diferencia del carbono total (CT) menos el carbono inorgánico (CI). El rango de COT que se puede encontrar en el agua potable es de 0.1 a 25 mg/L, para agua tratada de 0.1 a 20 mg/L y para agua dulce de 0.1 a 2 mg/L (APHA, 1995-b). Los resultados de las tablas 5.7, 5.8 y 5.9 muestran un incremento del COT en el agua de alimentación como en el agua de permeado. El incremento en el agua de alimentación puede venir de las tuberías de polietileno y de CPVC (polifloruro de vinil clorado), los cuales son polímeros sintéticos que en su estructura química contienen carbono. En el agua de permeado, este incremento puede deberse al soporte de la membrana, el cual es una malla de acero galvanizado con un revestimiento de pintura acrílica, la cual es afectada por la temperatura. Por lo anterior, se decidió realizar un estudio detallado con la finalidad de saber el origen del COT, sometiendo cada componente por separado a las mismas condiciones (80°C por 8 horas continuas con la mezcla de sales de NaCl y CaSO<sub>4</sub>). Se descarta la posibilidad del que el COT provenga de las membranas, así como de las juntas de neopreno que se encuentran en el interior de la unidad DMEA, esto lo comprueba los resultados mostrados en la Tabla 5.12.



Tabla 5.12. Resultados del COT obtenidos a partir de un tratamiento térmico a 80°C por 8 horas continuas.

Muestra	COT (mg/L)
Solución salina sintética (Blanco)	< 0.58*
Junta de Neopreno	< 0.58
Membrana PTFE	< 0.58
Membrana PVDF	< 0.58

\* Límite de detección o cuantificación del equipo.

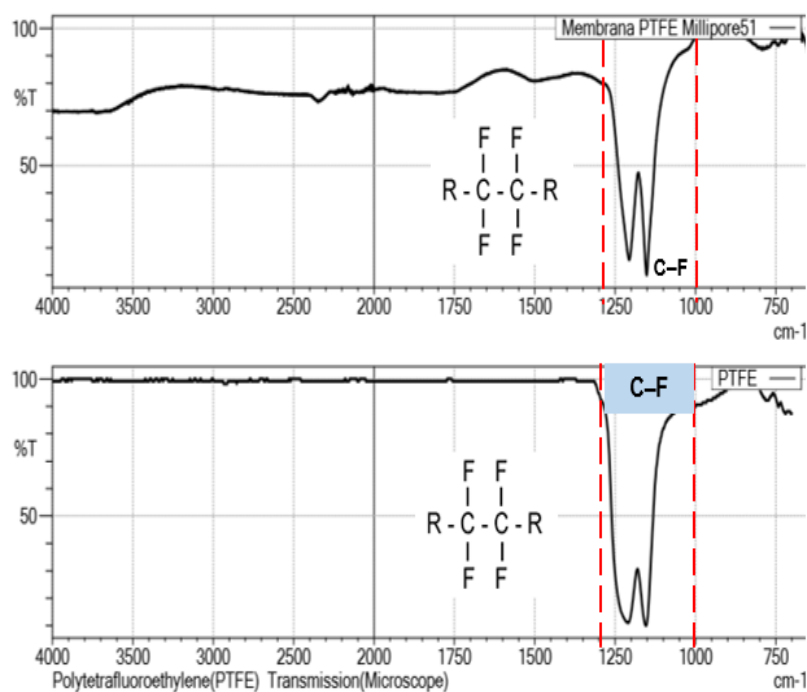
Como se mencionó en el párrafo anterior, el COT es un indicador comúnmente utilizado para medir la contaminación orgánica en el agua ultrapura. Por lo general, los niveles de impurezas son inferiores a los límites de detección: <0,05 µg/L en compuestos orgánicos volátiles y <0,025 µg/L en el caso de los semivolátiles. Estos niveles concuerdan con valores de COT inferiores a 1 µg/L (ppb). En la NOM-127-SSA1-1994 no se encuentra reportado un LMP para el COT, por lo que se decidió comparar los resultados de COT obtenidos en el agua de permeado con las especificaciones estándar para agua de uso reactivo propuesta por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) con número de designación D 1193-99. En la Tabla 5.13 se especifican cuatro tipos de grados con base en la calidad del agua de uso en el laboratorio o en aplicaciones donde se requiere agua con un contenido mínimo de impurezas. La mayoría del agua de permeado obtenida en nuestro sistema DMEA están por arriba del valor máximo establecido para agua grado reactivo Tipo III (0.2 mg/L de COT).

Tabla 5.13. Especificaciones para agua grado reactivo (ASTM, 1999).

Parámetro	Agua grado reactivo			
	Tipo I	Tipo II	Tipo III	Tipo IV
Conductividad eléctrica valor máximo a 25°C en µS/cm	0.056	1.0	0.25	5.0
Resistividad eléctrica valor mínimo a 25°C en MΩ.cm	18	1.0	4.0	0.2
pH a 25°C	A	A	A	5.0 a 8.0
Carbono Orgánico Total (COT) valor máximo en µg/L	50	50	200	No limite
Sodio valor máximo en µg/L	1	5	10	50
Cloruros valor máximo en µg/L	1	5	10	50
Sílice valor máximo en µg/L	3	3	500	No limite

<sup>A</sup> La medición del pH en aguas grado reactivo de Tipo I, II y III ha sido eliminada de esta especificación porque estos grados de agua no contienen constituyentes en cantidad suficiente para alterar significativamente el pH.

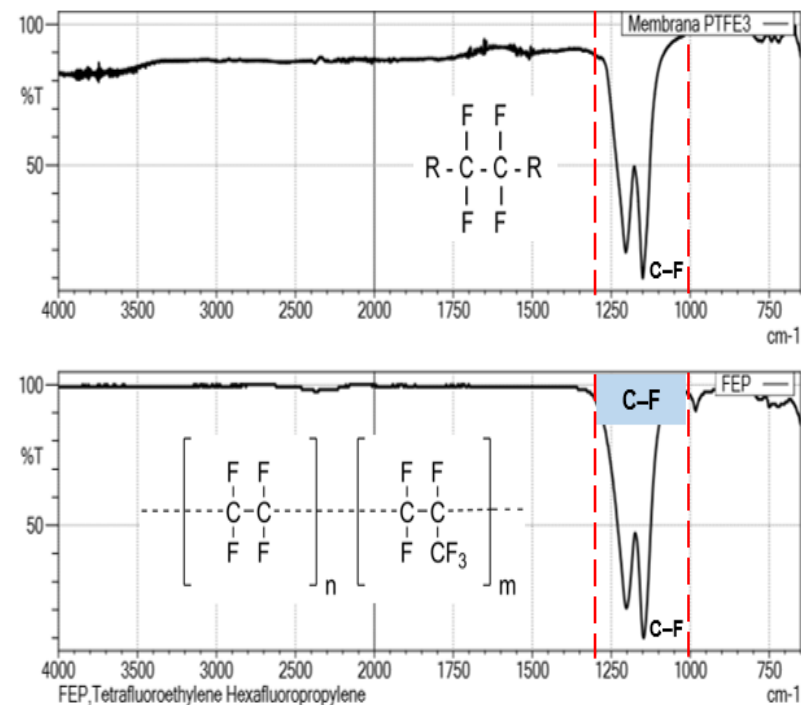
A partir de los resultados obtenidos del COT (Tablas 5.7, 5.8, 5.9 y 5.12), se procedió a realizar un análisis de la degradación a nivel molecular de las membranas de PTFE y PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$  por medio de espectroscopia infrarroja (IR). Las muestras de las membranas sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico (8 horas continuas de prueba a 80°C) se analizaron a través del espectrofotómetro infrarrojo por transformadas de Fourier (IFTR). Los resultados muestran un cambio (degradación parcial) en la estructura molecular de ambas membranas después de someterlas al tratamiento térmico. Sin embargo, esto no significa que las membranas se estén degradando completamente, ya que para llegar a ello se necesitan temperaturas superiores a los 200°C, temperaturas en las cuales no se alcanza en los sistemas DMEA. En las Figuras 5.8 y 5.9 se muestran los espectros IFTR de ambas membranas. En ellos se aprecia los grupos funcionales detectados, así como sus respectivas estructuras moleculares de las muestras comparadas con la base de datos del equipo, siendo el de mayor puntaje (celda número 1) el que más se asemeja a la muestra analizada.



C:\Program Files (x86)\LabSolutions\IR\Data\capacitacion\Rogelio\Membrana PTFE Millipore51.ispd

	Score	Library	Name	Comment
1	847	39 - T-Polymer2	PTFE	Polytetrafluoroethylene (PTFE) Transmission (Microscope)
2	845	15 - IRs Polymer2	FEP	FEP, Tetrafluoroethylene Hexafluoropropylene ATR/diamond ATRcorrected
3	841	40 - ATR-Polymer2	D_FEP	Tetrafluoroethylene-Hexafluoropropylene (FEP) DuraSampIR-II
4	836	39 - ATR-Polymer2	D_PTFE	Polytetrafluoroethylene (PTFE) DuraSampIR-II
5	796	40 - T-Polymer2	FEP	Tetrafluoroethylene-Hexafluoropropylene (FEP) Transmission (Microscope)

(a)

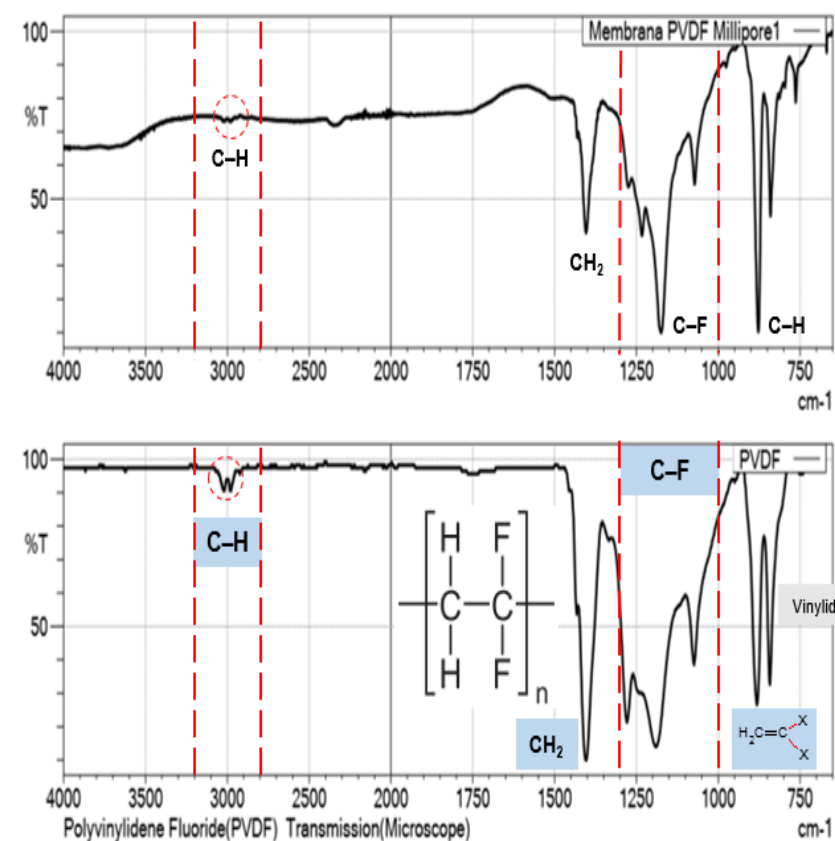


C:\Program Files (x86)\LabSolutions\IR\Data\capacitacion\Rogelio\Membrana PTFE3.ispd

	Score	Library	Name	Comment
1	886	15 - IRs Polymer2	FEP	FEP, Tetrafluoroethylene Hexafluoropropylene ATR/diamond ATRcorrected
2	886	40 - ATR-Polymer2	D_FEP	Tetrafluoroethylene-Hexafluoropropylene (FEP) DuraSampIR-II
3	883	39 - ATR-Polymer2	D_PTFE	Polytetrafluoroethylene (PTFE) DuraSampIR-II
4	849	159 - ATR-Polymer2	D_PTFE2	Poly (Tetrafluoroethylene) DuraSampIR-II
5	814	39 - T-Polymer2	PTFE	Polytetrafluoroethylene (PTFE) Transmission (Microscope)

(b)

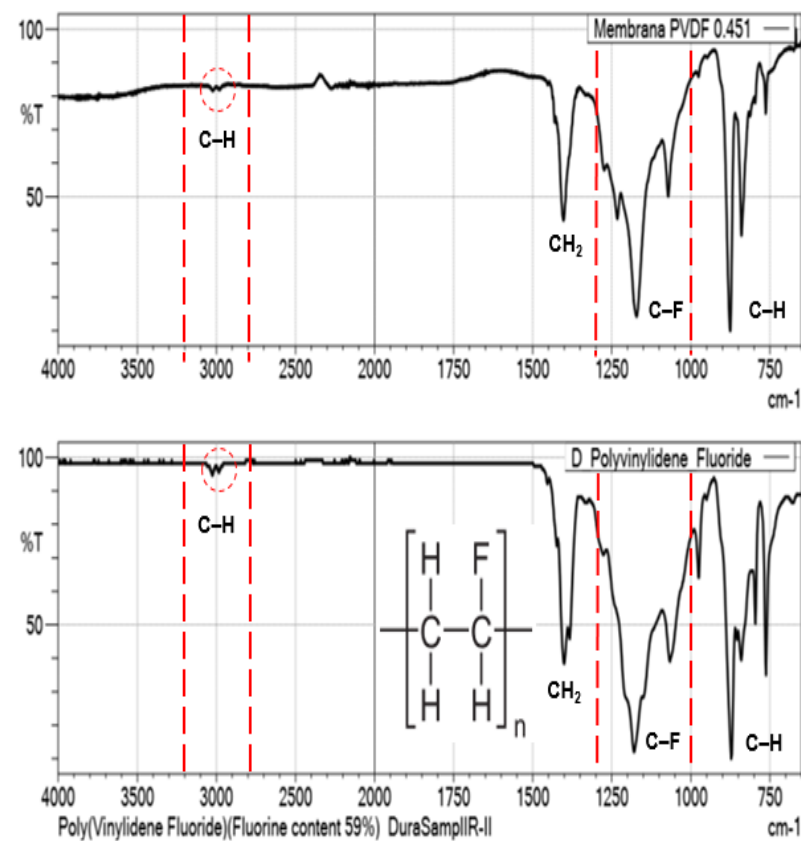
Figura 5.11. Espectros IFTR de la membrana PTFE de 0.45  $\mu\text{m}$  sin tratamiento térmico (a) y con tratamiento térmico (b).



C:\Program Files (x86)\LabSolutions\IR\Data\capacitacion\Rogelio\Membrana PVDF Millipore1.ispd

	Score	Library	Name	Comment
1	814	38 - T-Polymer2	PVDF	Polyvinilidene Fluoride(PVDF) Transmission(Microscope)
2	812	153 - ATR-Polymer2	D_Polyvinilidene_Fluoride	Poly(Vinylidene Fluoride)(Fluorine content 59%) DuraSampIR-II

(a)



C:\Program Files (x86)\LabSolutions\IR\Data\capacitacion\Rogelio\Membrana PVDF 0.451.ispd

	Score	Library	Name	Comment
1	830	153 - ATR-Polymer2	D_Polyvinilidene_Fluoride	Poly(Vinylidene Fluoride)(Fluorine content 59%) DuraSampIR-II
2	801	38 - T-Polymer2	PVDF	Polyvinilidene Fluoride(PVDF) Transmission(Microscope)

(b)

Figura 5.12. Espectros IFTR de la membrana PVDF de 0.45  $\mu\text{m}$  sin tratamiento térmico (a) y con tratamiento térmico (b).

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Se construyó una estación de prueba para evaluar dos tipos de membranas porosas e hidrófobas en una unidad DMEA existente. El prototipo experimental, se utilizó para realizar catorce pruebas experimentales. Con base en las pruebas realizadas se concluye lo siguiente:

-La producción de permeado se ve afectado principalmente por la temperatura de alimentación. Se observó una producción máxima de permeado de 9.23 L/m<sup>2</sup>h a 80°C con las membranas de PTFE y de 7.93 L/m<sup>2</sup>h para las membranas de PVDF para la misma temperatura de operación. Los resultados muestran que la producción de permeado presenta una tendencia de tipo exponencial como función de la diferencia de temperatura promedio entre el canal de alimentación y enfriamiento. El ajuste exponencial realizado presenta un R<sup>2</sup> en ambos casos de 0.99.

-El calor que se transfiere como calor latente de vaporización a través de la unidad empleando membranas de PTFE osciló en un intervalo de 77.39 % como máximo a un valor mínimo de 49.35 % dependiendo de las condiciones de operación. Las contribuciones por calor sensible a través del sistema osciló en un intervalo de entre el 35.8% y el 7.4%, mientras que las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 21.8%. Por otra parte, al utilizar membranas de PVDF el calor latente de vaporización osciló en un intervalo de 77.46 % como máximo a un valor mínimo de 51.09 % dependiendo de las condiciones de operación. El calor sensible transferido fue de 23.49% y 9.81%. Las pérdidas globales hacia el medio ambiente fueron evaluadas en un promedio de 29.69%. Se observó una mayor pérdida de calor al medio ambiente al emplear membranas de PVDF.

-Las membranas de PTFE y PVDF de 0.45 µm demostraron ser útiles para el proceso de separación de la DMEA, en ambos caso la calidad de agua de permeado se mantuvo por debajo de los límites máximos permisibles (LMP) de calidad de agua para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el 2000) para los parámetros: Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, DT, SDT y pH lo que posibilita, con un tratamiento posterior, la potabilización del producto. Sin embargo, el permeado no cumple con las especificaciones de grado reactivo propuesta por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) por las concentraciones de contaminación orgánica que fue medida a través de COT.

-Las membranas no presentaron desgaste térmico significativo a una temperatura de 80°C durante las pruebas de operación. Sin embargo, pruebas con mayor tiempo de exposición deber ser llevada a cabo con el fin de evaluar el posible desgaste con mayor tiempo de operación.

-Se observó que las membranas hidrófobas no retienen en su totalidad los iones. Para las membranas de PTFE y NaCl se observó un flujo máximo de sal de  $2.88 \times 10^{-5}$  g/min a una temperatura de 80 °C y un flujo menor de  $1.55 \times 10^{-5}$  g/min para una temperatura de 50 °C. Para el caso de la membrana de PVDF se observó un flujo máximo  $0.97 \times 10^{-5}$  g/min de NaCl a una temperatura de 80 °C y un flujo menor de  $0.68 \times 10^{-5}$  g/min de NaCl a una temperatura de operación de 50 °C. Con base en lo anterior se concluye que las membranas de PVDF retienen mayor cantidad de iones.

-Las pruebas de IFTR mostraron los mismos grupos funcionales del material que están fabricadas las membranas al comparar los espectros de absorción de una muestra sin tratamiento térmico contra una muestra con tratamiento térmico. Por lo tanto se concluye que no se observa degradación térmica en el tiempo de exposición.

-Se observó un GOR promedio muy similar en ambos casos: de 0.63 para la membrana de PTFE y de 0.64 para membranas de PVDF. En sistemas de una solo etapa sin recuperación de calor el GOR máximo posible es 1.0.

-El consumo de energía térmica promedio para las membranas de PTFE fue de 1.04 kWh/L mientras que para las membranas de PVDF el consumo promedio fue de 1.03 kWh/L. No se observa una diferencia significativa al comparar ambas membranas.

-La razón de recuperación en ambos es inferior al 1%. Para las membranas de PTFE se observó un valor de RR de 0.31% y para las membranas de PVDF 0.27 %. El cociente de desempeño en ambos casos fue el mismo con un valor de 0.7 L/Wm<sup>2</sup>h.

## Recomendaciones

- Se recomienda controlar la temperatura de enfriamiento mediante un chiller, con el fin de cuantificar el efecto de la temperatura de enfriamiento sobre la producción de permeado.
- Se recomienda buscar mejores soportes para la membrana. Deberán ser rígidos y porosos para lograr establecer el espaciamiento de aire y evitar el llenado parcial.
- Para evitar la contaminación orgánica (COT) se recomienda un cambiar las tuberías por tuberías de acero inoxidable. También se recomienda cambiar el soporte de membranas por mallas cerradas de 4 mm de acero inoxidable.
- Se recomienda realizar un lavado de aproximadamente 30 min cuando se utilice por primera vez las membranas descartando el permeado que se obtiene.
- Para compensar el bajo aporte de aniones y cationes o la ausencia de ellos, el agua de permeado puede ser remineralizada agregándole sales o mezclándola con el agua de rechazo del propio sistema desalinizador la cual dependerá de la aplicación o del uso final.

## Referencias

- Alkhudhiri A., Darwish, N., Hilal N. (2012a). Membrane distillation: A comprehensive review. *Desalination* 287, 2-18, DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.027.
- Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N. (2012b) Treatment of high salinity solutions: Application of air gap membrane distillation. *Desalination* 287, 55-60, DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.056
- Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N. (2013a). Treatment of saline solutions using Air Gap Membrane Distillation: Experimental study. *Desalination* 323, 2-7, DOI: 10.1016/j.desal.2012.09.010.
- Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N. (2013b). Produced water treatment: Application of Air Gap Membrane Distillation. *Desalination* 309, 46-51, DOI: 10.1016/j.desal.2012.09.017.
- APHA (1995a). Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition,
- APHA (1995b). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Method 5310B Total Organic Carbon (TOC)*. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition, 5-20 pp.
- ASTM (1999). *D 1193 Standard Specification for Reagent Water*. American Society for Testing and Materials.
- Banat F.A., Simandl J. (1998). Desalination by membrane distillation: a parametric study, *Sep. Sci. Technol.* 33 (2), 201-226.
- Banat F.A., Simandl J. (1994). Theoretical and experimental study in membrane distillation. *Desalination* 95 (1), 39-52, DOI: 10.1016/0011-9164(94)00005-0.
- Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. (2002). *Transport Phenomena*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2nd ed., 914 p., ISBN: 0-471-41077-2.
- Blanco J., García-Rodríguez L., Martín-Mateos I. (2009). Seawater desalination by an innovative solar-powered membrane distillation system: the MEDESOL project, *Desalination* 246 (1-3), 567-576, DOI: 10.1016/j.desal.2008.12.005.
- Bouguecha S., Dhahbi M. (2002). Fluidised bed crystalliser and air gap membrane distillation as a solution to geothermal water desalination, *Desalination* 152 (1-3), 237-244, DOI: 10.1016/S0011-9164(02)01069-X.
- Cengel Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. México: Mc Graw Hill, 3a ed., 904 p., ISBN-13: 978-970-10-6173-2; ISBN-10: 970-10-6173-X.
- Cengel Y. A., Boles M. A. (2012). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill, 7a ed., 1041 p., ISBN: 978-607-15-0743-3.
- CONAGUA (2015). *Estadísticas del agua en México edición 2015*. Comisión Nacional del Agua. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2015.pdf>
- CONAPO (2015). *Proyecciones de la población 2010-2050*. Consejo Nacional de Población. Disponible en: <http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Proyecciones>
- Dehesa-Carrasco U., Pérez-Rábago C.A., Arancibia-Bulnes C.A. (2013). Experimental evaluation and modeling of internal temperatures in an air gap membrane distillation unit, *Desalination* 326, 47-54, DOI: 10.1016/j.desal.2013.07.014
- Dehesa-Carrasco U. (2013). *Estudio de transferencia de calor y masa en un sistema de destilación por membrana con espaciado de aire*, Tesis de Doctorado, Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería (Energía-Solar Fototérmica), Instituto de Energías Renovables, Universidad Autónoma de México, p.85.
- Dévora-Isiordia, G.E., González Enríquez, R., Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluation of Desalinization Processes and their Development in Mexico. *Water Technology and Sciences*, 4:3, 25-43.



- El-Bourawi M.S., Ding Z., Ma R., Khayet M. (2006). A framework for better understanding membrane distillation separation process, *J. Membr. Sci.* 285, 4-29, DOI: 10.1016/j.memsci.2006.08.002.
- Garcia-Rodriguez L., Gomez-Camacho C. (2001). Exergy analysis of the SOL- 14 plant (Plataforma Solar de Almeria, Spain), *Desalination* 137, 251-258.
- Gleick, P.H. 2002. *The World's Water 2002-2003: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island Press, Washington, D.C.
- Gryta M., Tomaszewska M., Morawski A.W. (1997). Membrane distillation with laminar flow. *Sep. Purif. Technol.* 11, 93-101.
- Guerra F.J., Struck, A., Villalobos S.A. (2008). Practica 6: Ablandamiento por intercambio iónico. En: *Universidad Iberoamericana Ciudad de México*. Disponible en: [http://fjartnmusic.com/Personal/8o\\_Semestre\\_files/LIAPreP6.pdf](http://fjartnmusic.com/Personal/8o_Semestre_files/LIAPreP6.pdf)
- Guillen-Burrieza E., Ruiz-Aguirre A., Zaragoza G., Hassan A.A. (2014). Membrane fouling and cleaning in long term plant-scale membrane distillation operations, *Journal of Membrane Science* 468, 360-372, DOI: 10.1016/j.memsci.2014.05.064.
- Guillen-Burrieza E., Blanco J., Zaragoza G., Alarcon D., Palenzuela P., Ibarra M., Gernjak W. (2011). Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system, *J. Membr. Sci.* 379 (1-2) 386-396.
- Hernández A. (2014). Como influye el pH en salud humana. En: *Powered by Blogger..* Disponible en: <http://phenserhumano.blogspot.mx/>
- IDA (2007). *Desalting Plants Inventory*. Madrid: International Desalination Association, p. 210.
- IDA (2010). *Desalination Yearbook. Market profile*. Pankratz T. Dubai: International Desalination Association, 2010, pp. 102-153.
- Incropera F.P., DeWitt D.P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: PRENTICE HALL, 4a ed., p. 912, ISBN: 970-17-0170-4.
- Izquierdo-Gil M.A., Garcia-Payo M.C., Fernandez Pineda C. (1999). Air gab membrane distillation of sucrose aqueous solutions. *J. Membr. Sci.* 155, 291-307.
- Kemmer F., Mc Callion J. (1989). *Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones (Tomo III)*. Nalco Chemical Company: McGraw-Hill.
- Kiely G. (1999). *Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión* Madrid: Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A.U.
- Koschikowski J., Wieghaus M., Rommel M. (2003). Solar thermal-driven desalination plants base on membrane distillation, *Desalination* 156, 295-304.
- Lattemann S., Höpner T. (2007). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220(1-3):1-15, DOI: 10.1016/j.desal.2007.03.009.
- Lattemann S. (2010). *Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants*. Netherlands: CRC Press/Balkema (Taylor & Francis Group), p 276. ISBN: 978-0-415-58326-8
- Manna A.K., Sen M., Martin A.R., Pal P. (2010). Removal of arsenic from contaminated groundwater by solar-driven membrane distillation. *Environmental Pollution* 158, 805-811, DOI: 10.1016/j.envpol.2009.10.002.
- Nejati S., Boo C., Osuji C.O., Elimelech M., (2015). Engineering flat sheet microporous PVDF.
- Ramon G., Agnon Y., Dosoretz C. (2009), Heat transfer in vacuum membrane distillation: Effect of velocity slip, *Journal of Membrane Science* 331, 117-125.
- Rodríguez S. (2010). La dureza del agua. *Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional*. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza\\_agua.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf).

- Secretaría de Economía (2013). *Norma Mexicana NMX-AA-007-SCFI-2013*. Análisis de agua – medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2011). *Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2011*. Análisis de agua – determinación del pH – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001*. Análisis de agua – determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001*. Análisis de agua – determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2001*. Análisis de agua – determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001*. Análisis de agua – determinación de dureza total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2001). *Norma Mexicana NMX-AA-073-SCFI-2001*. Análisis de agua – determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2010). *Norma Mexicana NMX-AA-074-SCFI-2010*. Análisis de agua – medición del ion sulfato, en aguas naturales, potables y residuales – método de prueba.
- Secretaría de Economía (2000). *Norma Mexicana NMX-AA-093-SCFI-2000*. Análisis de agua – determinación de la conductividad electrolítica – método de prueba.
- Secretaría de Salud (2010) *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2010*. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Shatat M., Riffat S.B. (2012). Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, *Int. J. Low-Carbon Tech.*, DOI: 10.1093/ijlct/cts025.
- Shirazi M.M.A., Kargari A. (2015). A review on application of membrane distillation (MD) process for wastewater treatment, *J. Memb. Sci. Res.* 1, 101–112.
- Tiwari G.N., Singh H.N, Tripathi R. (2003). Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 75, 367–73.
- Walton J., Lu H., Tumer C., Solis S., Hein H. (2004). Solar and waste heat desalination by membrane distillation, *Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 81*, 2004.
- Warsinger D. M., Swaminathan J., Guillen-Burrieza E., Hassan A.A., Lienhard J. H. (2015). Scaling and fouling in membrane distillation for desalination applications: A review. *Desalination* 356, 294-313, DOI: 10.1016/j.desal.2014.06.031.

## Anexo A. Descripción algebraica para la difusión ordinaria

El flujo de masa de la especie A, en relación con un sistema fijo de coordenadas (Euleriano)

$$n_A^II \equiv \rho_A v_A \quad (\text{A.1})$$

Donde  $v_A$  representa la velocidad promedio de todas las partículas de A en un pequeño elemento de volumen de control.

Por otra parte, el flujo de masa de la especie B, se define como:

$$n_B^II \equiv \rho_B v_{AB} \quad (\text{A.2})$$

El flujo de masa en el volumen de control está dada por la contribución de ambas especies de tal manera que:

$$n^II = n_A^II + n_B^II \quad (\text{A.3})$$

Luego entonces se establece la siguiente relación

$$n^II = \rho v = n_A^II + n_B^II = \rho_A v_A + \rho_B v_B \quad (\text{A.4})$$

La velocidad promedio para la mezcla se puede derivar a partir de la relación anterior

$$\rho v = \rho_A v_A + \rho_B v_B \quad (\text{A.5})$$

Despejando  $v$  y expresando en términos de la fracción de masa ( $w_i = \rho_i / \rho$ ) se reduce a

$$v = w_A v_A + w_B v_B \quad (\text{A.6})$$

Las velocidades ( $v, v_A, v_B$ ) y los flujos ( $n^II, n_A^II, n_B^II$ ) se han definido como cantidades absolutas. Es decir, mediante ejes que son fijos en el espacio.

Ahora bien, si queremos expresar el flujo de masa de la especie A en relación a la velocidad de la masa promedio de la mezcla, es necesario realizar las adecuaciones pertinente para la descripción Lagrangeana. De tal manera que el flujo de masa de B relativo a la velocidad de masa promedio de la mezcla (flujo difusivo) se define como:

$$j_A \equiv \rho_A (v_A - v) \quad (\text{A.7})$$

Desarrollando

$$j_A = \rho_A v_A - \rho_A v \quad (\text{A.8})$$

$$j_A = n_A^II - \rho_A v \quad (\text{A.9})$$

Sustituyendo  $v$  en la ecuación A.9 ( $v$  en términos de la densidad como se expresa en la ec. A.5)

$$j_A = n_A^II - \frac{\rho_A}{\rho} (\rho_A v_A + \rho_B v_B) \quad (\text{A.10})$$

Re expresando

$$j_A = n_A^II - w_A (n_A^II + n_B^II) \quad (\text{A.11})$$

Despejando

$$n_A^II = j_A + w_A (n_A^II + n_B^II) \quad (\text{A.12})$$

Dado que  $j_A$  es el flujo difusivo de la especie. Sustituyendo la ec A.6 en la ec. A.12 se obtiene:

$$n_A^{II} = -\rho D_{AB} \nabla w_A + w_A (n_A^{II} + n_B^{II}) \quad (\text{A.13})$$

Siguiendo el procedimiento anterior es posible obtener la ec. A.13 equivalente con una base molar.

$$N_A^{II} \equiv C_A v_A \quad y \quad N_B^{II} \equiv C_B v_B \quad (\text{A.14})$$

La velocidad promedio molar para la mezcla se expresa como  $v^*$

$$N^{II} = N_A^{II} + N_B^{II} = C v^* = C_A v_A + C_B v_B \quad (\text{A.15})$$

Representando la velocidad en términos de la fracción molar la velocidad resulta en

$$v^* = x_A v_A + x_B v_B \quad (\text{A.16})$$

Es claro como en el caso anterior los flujos y las velocidades están expresadas utilizando una descripción Euleriana, definiendo las ecuaciones utilizando una descripción lagrangeana, las ecuaciones se expresan como

$$J_A^* \equiv C_A (v_A - v^*) \quad (\text{A.17})$$

La cual a su vez se reduce a

$$N_A^{II} = J_A^* + C_A v^* \quad (\text{A.18})$$

$$N_A^{II} = -C D_{AB} \nabla x_A + x_A (N_A^{II} + N_B^{II}) \quad (\text{A.19})$$

Y cumpliendo la condición

$$J_A^* + J_B^* = 0 \quad (\text{A.20})$$

## Anexo B. Descripción algebraica para la difusión térmica

El flujo molar neto, estará dada por una combinación ordinaria y difusión térmica:

$$N_A^{II} = -cD_{AB} \left( \nabla x_A + \frac{K_T}{T} \nabla T \right) + x_A (N_A^{II} + N_B^{II}) \quad (\text{B.1})$$

Despejando

$$N_A^{II} - x_A (N_A^{II} + N_B^{II}) = -cD_{AB} \left( \nabla x_A + \frac{K_T}{T} \nabla T \right) \quad (\text{B.2})$$

Bajo condiciones estacionarias y considerando que el aire se encuentra “estancado”, es decir  $N_B = 0$  y  $l_{ga} < 5 \text{ mm}$ , al factorizar la expresión anterior se obtiene:

$$N_A^{II} = \frac{-cD_{AB}}{1-x_A} \left( \nabla x_A + \frac{K_T}{T} \nabla T \right) \quad (\text{B.3})$$

Integrando

$$N_A^{II} = -cD_{AB} \int_0^\delta \frac{\nabla x_A}{1-x_A} + \frac{-cD_{AB}K_T}{1-x_A} \int_{T_4}^{T_2} \frac{\nabla T}{T} \quad (\text{B.4})$$

Aplicando la propiedad de logaritmos

$$N_A^{II} = -\frac{cD_{AB}}{\delta} \ln \frac{1-x_{A0}}{1-x_{A\delta}} - \left\langle \frac{cD_{AB}K_T}{1-x_A} \right\rangle \frac{1}{\delta} \ln \frac{T_4}{T_2} \quad (\text{B.5})$$

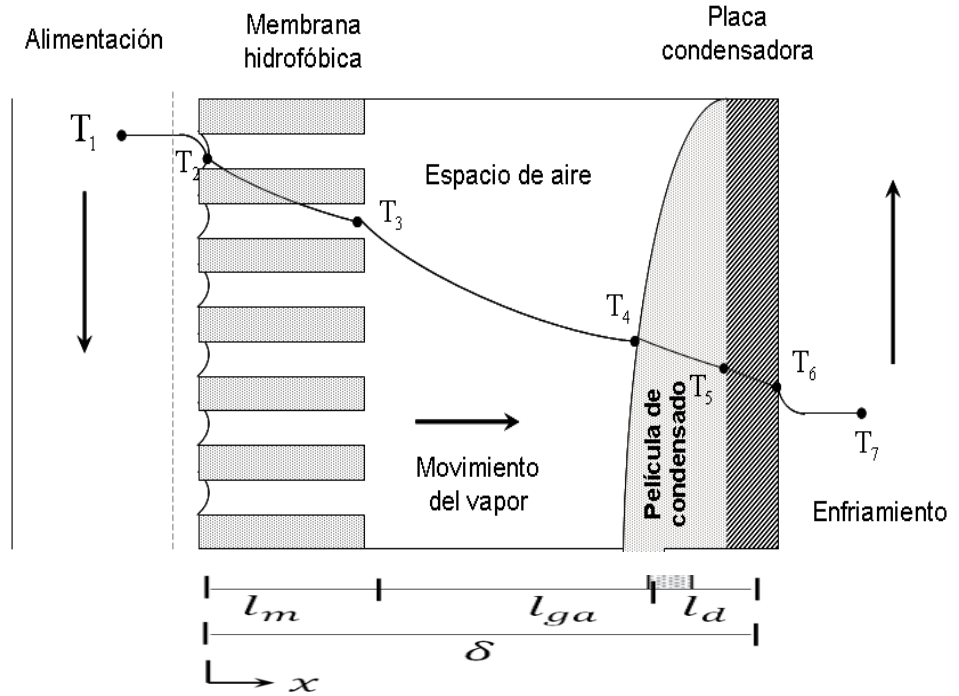


Figura B.1. Representación conceptual de una configuración DMEA

Considerando las siguientes condiciones a fin de resolver la ecuación

- Condiciones estacionarias de operación
- El aire contenido en el espacio de aire se considera estancado por lo tanto,  $N_B^{II} = 0$
- Película descendente sin ondulaciones cuyo espesor,  $l_d \ll l_{ga}$
- Que el espesor de la membrana,  $l_m \ll \delta$
- No se desarrolla convección natural al considerar  $l_{ga} < 5 \text{ mm}$
- Membrana porosa he hidrófoba  $\therefore \Rightarrow x_{A,3} \cong x_{A,2}$

Considerando que el aire se encuentra “estancado”, es decir  $N_B^{II} = 0$  al factorizar la expresión anterior se obtiene

$$N_A^{II} = \frac{-cD_{AB}}{1-x_A} \left( \nabla x_A + \frac{K_T}{T} \nabla T \right) \quad (\text{B.6})$$

Dado que la longitud característica del sistema en la componente  $y$  es mucho mayor que el espesor del sistema compuesto membrana-espesor de aire, consideramos que la difusión combinada se lleva a cabo en una sola dirección.

Evaluando las condiciones de frontera Cuando  $x = 0$

$$-cD_{AB} \frac{dx_A}{dx} \Big|_{x=0} = N_{A,0}^{II} \quad (B.7)$$

Y cuando  $x = \delta$

$$\frac{dx_A}{dx} \Big|_{x=\delta} = 0 \quad (B.8)$$

Evaluando en los límites correspondientes a la región del espacio de aire-membrana,

$$\int_0^\delta N_A^{II} dx = -cD_{AB} \int_{x_{A,0}}^{x_{A,\delta}} \frac{1}{1-x_A} dx_A - \frac{cD_{AB}K_T}{1-x_A} \int_{T_2}^{T_4} \frac{1}{T} dT \quad (B.9)$$

Integrando, aplicando propiedad de logaritmos y despejando se obtiene

$$N_A^{II} = -\frac{cD_{AB}}{\delta} \ln \frac{1-x_{A0}}{1-x_{A\delta}} - \left\langle \frac{cD_{AB}K_T}{1-x_A} \right\rangle \frac{1}{\delta} \ln \frac{T_4}{T_2} \quad (B.10)$$

Donde  $\delta$  es el espesor combinado de la membrana y el espacio de aire como se muestra en la Figura B.1.

Bajo las condiciones de interés del modelo experimental, la ecuación B.10 puede expresarse de una forma aproximada, haciendo las siguientes consideraciones.



- El espesor de la membrana es muy pequeño comparado con el espesor del aire. En este sentido la diferencia de temperatura  $T_2 - T_3$  es mucho más pequeña que la diferencia de  $T_3 - T_4$  (Ver Figura B.1).
- En el modelo matemático descrito en la ecuación B.10, la temperatura  $T_4$  corresponde a la temperatura superficial de la película de condensado. En el modelo aproximado de la ecuación B.10 se asume que  $T_m = \frac{T_4 + T_5}{2}$ , es equivalente a la temperatura de la película de condensado.

Con base en estas dos suposiciones descritas, se puede expresar de la siguiente manera.

$$N_A^{II} \approx -\frac{cD_{AB}}{\delta} \ln \frac{1-x_{A0}}{1-x_{A\delta}} - \left\langle \frac{cD_{AB}K_T}{1-x_A} \right\rangle \frac{1}{\delta} \ln \frac{T_m}{T_3} \quad (\text{B.11})$$

Donde  $N_A^{II}$  es el flujo molar neto de la especie A a través de una película de aire estancado.

## Anexo C. Tablas de vibraciones y grupos funcionales (IFTR)

**Tabla C.1.** Grupos funcionales fácilmente localizados durante la lectura inicial de un espectro.

Grupo Funcional o Vibración	Posición de la banda (cm <sup>-1</sup> )
O—H <sub>o</sub> , N—H	3500-3200
C—H	3200-2800
C≡N, C≡C	2250-2000
C=O	1800-1600
C=C, anillos aromáticos	<1000

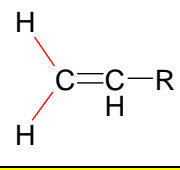
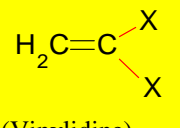
**Tabla C.2.** Vibraciones de curvatura de alcanos C-H

Grupo Funcional o Vibración	Posición de la banda (cm <sup>-1</sup> )
CH <sub>3</sub> Curva asimétrica	1470-1450
CH <sub>3</sub> Curva simétrica (modo sombrilla)	1385-1365
CH <sub>2</sub> Tijeras	1465-1445
CH <sub>2</sub> Roca	730-710

**Tabla C.3.** Posiciones de la banda de los estiramientos C-X para las moléculas orgánicas halógenas

Grupo Funcional o Vibración	Posición de la banda (cm <sup>-1</sup> )
C-F	1300-1000
C-Cl	800-600
C-Br	650-550
C-I	570-500

**Tabla C.4.** Estiramiento C=C, estiramiento C-H y curvaturas de bandas C-H de alquenos

Grupo Funcional	Posición de la banda de estiramiento C-H (cm <sup>-1</sup> )	Posición de la banda de estiramiento C=C (cm <sup>-1</sup> )	Posición de la banda de curvatura fuera del plano C-H (cm <sup>-1</sup> )
 (Vinyl)	3090-3075	1660-1630	995-985, 915-905
 (Vinylidene)	3090-3075	1660-1630	895-885