



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

DESALACIÓN DE AGUA MARINA CON TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS EN
OAXACA, MÉXICO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ONAN JIMÉNEZ ROBLES

DIRECTOR
EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN, INSTITUTO DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL DE 2024.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

El uso de imágenes, fragmentos de videos, 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 donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza emocional y espiritual para seguir avanzando en mis objetivos académicos y personales...

A Mi Madre:

María Teresa Robles Diaz.

Dios le puso a la mujer la hermosura en el rostro,

Pero si no tiene la hermosura en el rostro,

La tiene en el corazón,

Y si no tiene la hermosura en el corazón,

La tiene en el alma,

Y si no la tiene en el alma,

Reclámeselo a Dios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Sistema de Control de Estudiantes del Instituto de Ingeniería (SICOE) UNAM por el apoyo mensual de beca para desarrollarme en la maestría en ingeniería.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por permitirme hacer uso de las instalaciones para desarrollar los experimentos.

Al Dr. Rodolfo Silva Casarín y al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin por apoyarme desde un principio y hasta el día de hoy.

A Ziomara de la Cruz y Elier Sandoval por su tiempo en compartirme sus conocimientos y aconsejarme sobre el trabajo desarrollado.

A mis familiares y amigos que siempre estuvieron para darme unas palabras de aliento.

ÍNDICE

ÍNDICE	3
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS.....	11
RESUMEN.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Introducción	14
1.2. Objetivos.....	15
1.2.1. Objetivos generales	15
1.2.2. Objetivo particular	15
1.3. Alcance.....	16
1.4. Hipótesis.....	16
2. BOSQUEJO GENERAL DE LA DEZALINIZACIÓN EN EL MUNDO Y EN MÉXICO	18
2.1. Definición de desalinización	18
2.2. ¿Cuánta agua hay en el mundo?.....	18
2.3. Plantas desalinizadoras más grandes en el mundo.....	19
2.3.1. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Sorek	19
2.3.1.1. Información General	20
2.3.1.2. Propósito de la planta desaladora	20
2.3.1.3. Liderazgo tecnológico	20
2.3.1.4. Precios competitivos	21
2.3.1.5. Responsabilidad ambiental	21
2.3.2. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Ashdod	22
2.3.2.1. Información General	22
2.3.2.2. Competitividad	23
2.3.3. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Port Stanvac.....	23
2.3.3.1. Información General	23
2.3.3.2. Competitividad	24
2.3.4. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Torrevieja	25
2.3.4.1. Información General	25
2.3.4.2. Características técnicas	26
2.4. Países con más plantas desalinizadoras en el mundo	27
2.5. La desalación en México	31

2.6. Plantas desalinizadoras en México	31
2.6.1. Producción y usos del agua desalinizada.....	34
3. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS PARA LA DESALACIÓN DE AGUA MARINA	38
3.1. Acerca de la tecnología de membranas	38
3.2. Generalidades de los procesos de separación con membranas.....	38
3.2.1. Funcionamiento de una membrana	39
3.2.2. Tipos de membranas	40
3.2.3. Características de la configuración de membranas	45
3.3. Plantas desalinizadoras en el mundo con membranas.....	45
3.3.1. La desalinización en el mundo.....	45
3.3.2. Características opcionales para las soluciones de membranas	46
3.3.3. Investigación sobre la tecnología de membranas	46
3.4. La desalinización con tecnología de membranas en México	48
4. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN CON TECNOLOGÍA DE MEMBRANA Y SISTEMAS TÉRMICOS, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA MARINA	50
4.1. Métodos de desalación con tecnología de membranas	50
4.2. Ósmosis Inversa (OI)	50
4.2.1. Ventajas.....	55
4.2.2. Desventajas.....	55
4.3. Nanofiltración (NF).....	58
4.3.1. Ventajas.....	59
4.3.2. Desventajas.....	59
4.4. Ultrafiltración (UF).....	60
4.4.1. Ventajas.....	61
4.4.2. Desventajas.....	61
4.5. Microfiltración (MF).....	61
4.5.1. Ventajas.....	62
4.5.2. Desventajas.....	62
4.6. Electrodialisis.....	63
4.6.1. Ventajas.....	64
4.6.2. Desventajas.....	64
4.7. Sistemas de tratamiento térmico	65
4.7.1. Destilación por Compresión Mecánica de Vapor (MVC)	65
4.7.2. Destilación flash multietapa (MSF).....	66
4.7.3. Destilación multiefecto (MED)	67

4.8.	Otras tecnologías que se utilizan.....	68
4.8.1.	Congelación.....	68
4.8.2.	Formación de hidratos.....	68
5.	CÁLCULO TEÓRICO DE DESALACIÓN CON MEMBRANAS.....	70
5.1.	Descripción general de las membranas de intercambio iónico.....	70
5.2.	Equilibrio de Donnan y potencial de membrana.....	70
5.3.	Hidrodinámica y transporte de masa en electrodiálisis.....	74
5.4.	Fenómenos de polarización de la concentración.....	74
5.5.	Ecuaciones de transporte de masa y condiciones de corriente límite/sobrelímite.....	77
5.5.1.	Formulación de ecuaciones de transporte de masa en ED y procesos relacionados.....	77
5.5.2.	Limitación de la densidad de corriente en unidades ED.....	77
5.5.3.	Influencia de los fenómenos de polarización en la caída de tensión.....	79
5.5.4.	Correlaciones para coeficientes de transferencia de masa.....	82
5.5.5.	Correlaciones para la caída de presión y la influencia de la potencia de bombeo en consumos de energía.....	82
5.6.	Modelos de procesos y herramientas de simulación para electrodiálisis y procesos relacionados.....	84
5.7.	Modelos basados en Nernst-Planck.....	86
5.7.1.	Caída de voltaje sobre el par de celdas por el modelado de segmentación.....	87
5.7.2.	Balances de masa y transporte a través de membranas.....	88
5.7.3.	Aproximaciones complejas para fenómenos no óhmicos y transporte de masa modelos.....	89
5.7.4.	Modelos simplificados para la simulación y diseño de sistemas ED.....	90
6.	EXPERIMENTACIÓN DE DESALACIÓN DE AGUA MARINA CON MÉTODO DE ELECTRODIÁLISIS.....	94
6.1.	Marco teórico.....	94
6.2.	Parámetros del agua que afectan al proceso.....	94
6.2.1.	Salinidad.....	94
6.2.2.	TDS.....	95
6.2.3.	Temperatura.....	95
6.2.4.	pH.....	96
6.2.5.	Conductividad eléctrica.....	97
6.2.6.	Potencial redox.....	97
6.2.7.	Densidad relativa.....	97

6.3. Diseño experimental	98
6.3.1. Equipo y material.....	98
6.3.2. Desarrollo.....	98
6.3.2.2. Configuración del experimento de Electrodiálisis	104
6.3.2.2.1. Membranas	104
6.3.2.2.2. Electroodos.....	104
6.3.2.2.3. Bomba peristáltica.....	104
6.3.2.2.4. Aditamentos adicionales	104
6.3.2.2.5. Solución de enjuague.....	104
6.3.2.2.6. Voltaje, gasto y velocidad.....	105
6.3.2.3. Construcción de la Celda Electrolítica.....	106
6.3.2.4. Pruebas de fugas	106
6.3.2.5. Toma de lecturas de los parámetros del agua.....	107
6.3.2.6. Diagramas del proceso de desalación de agua marina	109
6.3.2.7. Experimento de desalación de agua marina	111
6.4. Obtención de resultados	112
7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	120
7.1. Conclusiones	120
7.2. Futuras líneas de trabajo	121
BIBLIOGRAFÍA	122
ANEXOS	130
ANEXO A. FICHA TÉCNICA DE LAS MEMBRANAS.	130
ANEXO A.1 Características de las membranas	130
ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA PERISTÁLTICA.....	131
ANEXO B.1 Datos generales de la bomba peristáltica.....	131
ANEXO B.2 Características particulares de la bomba peristáltica	131

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema del planeta Tierra, agua salada, agua dulce y la superficie continental que lo conforma. Fuente: (FAO ONU).....	18
Figura 2.2 IDAM Sorek planta desalinizadora SWRO más grande y avanzada del mundo. Fuente: (Technologies, i., 2018).....	19
Figura 2.3 IDAM Ashdod planta desalinizadora tiene uno de los pretratamientos de ultrafiltración más grandes del mundo. Fuente: (Technologies., i.,2018).....	22
Figura 2.4 IDAM Port Stanvac planta desalinizadora localizada en Australia en la localidad de Port Stanvac. Fuente: (Aquaes.,2022).....	23
Figura 2.5 IDAM Torre Vieja planta desalinizadora localizada en España. Fuente: (Iagua., 2022).....	25
Figura 2.6 Países con más plantas desaladoras. Fuente: IDA (2007).	27
Figura 2.7 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).....	28
Figura 2.8 Capacidad mundial de desalación en m ³ /día. Fuente: IDA (2007).....	34
Figura 2.9 Perfil mundial de desalinización. Fuente: IDA (2007).	35
Figura 2.10 Costo de producción y consumo energético de procesos de desalinización. Fuente: IDA (2007).	35
Figura 3.1 Membranas microscópicas porosas. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).	41
Figura 3.2 Membranas microscópicas porosas. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).	41
Figura 3.3 Membrana simétrica. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).	42
Figura 3.4 Membrana asimétrica. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).	42
Figura 3.5 Esquema de un módulo de membrana tipo placa típico. El canal de alimentación también puede tener un espaciador (no mostrado). Fuente: (Román, M. G., 2009-2010.Z).	43
Figura 3.6 Esquema de una membrana estructura microscópica tubular. Fuente: (Berk, Z., 2009).	43
Figura 3.7 Membrana de arrollamiento espiral. Fuente: (Potable, e. A., 2019).	44
Figura 3.8 Membrana de fibra hueca. Fuente: (Berk, Z., 2009).	44
Figura 4.1 Dos líquidos separados por una membrana su concentración, proceso de Ósmosis. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).....	51
Figura 4.2 Procesos de Ósmosis Inversa, aplicando presión en el agua salada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).....	51
Figura 4.3 Obtención de agua dulce con poca sal. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	52
Figura 4.4 Extracción de agua de mar para primer tratamiento. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	52

Figura 4.5 Proceso de desalación con Ósmosis Inversa del agua tratada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	53
Figura 4.6 Dilución de salmuera, residuo del agua de mar tratada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	53
Figura 4.7 Cloración y remineralización del agua dulce obtenida. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	54
Figura 4.8 Almacenamiento del agua potable, lista para consumo humano. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).	54
Figura 4.9 Esquema general de una planta desaladora por Ósmosis inversa. Fuente: (A. E. s.f., 2023).	57
Figura 4.10 Esquema general de una planta de Nanofiltración. Fuente: (S.a.s., f. Y. 2023).	58
Figura 4.11 Esquema general de una planta de Ultrafiltración. Fuente: (S.a.s., f. Y.,2004).	60
Figura 4.12 Esquema general de una planta de Microfiltración. Fuente: (Filtros anoia, s., s.f.).	62
Figura 4.13 Esquema general del proceso de Electrodiálisis. Fuente: (Antonino campione, a. C., 2019).	63
Figura 4.14 Esquema general de una planta de Electrodiálisis Inversa. Fuente: (Arema, 2022).	64
Figura 4.15 Esquema de destilación por compresión mecánica de vapor. Fuente: (Norlandintl 2004).	66
Figura 4.16 Procesos de desalinización mediante MSF. Fuente: (Veolia, 2009).	67
Figura 4.17 Procesos de Destilación Multiefecto (MED). Fuente: (Cetenma, 2008).	68
Figura 5.1 Representación esquemática de la concentración de iones y potencial eléctrico para una solución de electrolito monovalente binario en una membrana de intercambio catiónico sumergida entre una solución diluida y otra concentrada. Fuente: (Campione, 2018).	70
Figura 5.2 Puntos de la curvatura durante la carga.	73
Figura 5.3 Perfil de concentración dentro de la capa de difusión inducida por corriente en condiciones de estado estable: perfil de concentración lineal de Nernst (línea discontinua); Perfil de Levich teniendo en cuenta la contribución de la convección. (línea continua), donde la concentración difiere de la concentración a granel solo en un 1 % a la distancia δ_{Levich} de la IEM. Fuente: (Campione, 2018).	75
Figura 5.4 Bosquejo de una curva corriente-voltaje típica para IEM sumergido en una solución electrolítica, que muestra una densidad de corriente límite y la presencia de tres regiones distintas. Fuente: (Campione, 2018).	78
Figura 5.5 Segmentación del sistema compuesto por una membrana y dos soluciones de baño, según la teoría TMS, mostrando concentración de contraiones y cambios de potencial eléctrico en cada capa. El ejemplo de la imagen muestra una CEM inmerso entre una solución diluida y una solución concentrada. Fuente: (Campione, 2018).	79

Figura 5.6a) Números de Reynolds inferiores: resultados de simulaciones CFD de flujo completamente desarrollado dentro de espaciadores tejidos con diferentes relaciones de altura de paso ($\Delta l/h$) y ángulos de ataque de flujo (γ). Fuente: (Campione, 2018).	83
Figura 5.6b) Números de Reynolds más altos: datos experimentales sobre promotores de remolinos flotantes con diferentes relaciones entre altura y altura ($\Delta l/h$). Fuente: (Campione, 2018).	83
Figura 5.7 Diagrama de bloques que muestra la clasificación de las herramientas de modelado, junto con las principales características de cada clase de modelos. Fuente: (Campione,2018).	85
Figura 6.1 Sales disueltas en una gota de agua marina.	95
Figura 6.2 Playa Puerto Angelito, Oaxaca, México.	99
Figura 6.3 Nativos de Playa Puerto Angelito.	99
Figura 6.4 Brigada en la costa, finalizando la toma de muestra.	100
Figura 6.5 Cuantificación de los parámetros con el aparato de medición.	100
Figura 6.6a) Medición de la Salinidad con el Refractómetro. Figura 6.6b) Acercamiento de la medición con el Refractómetro.	101
Figura 6.7a) Medición de la Salinidad con el Refractómetro. Figura 6.7b) Separación del agua marina y la arena.	102
Figura 6.8a) Colocación del tamiz en el recipiente. Figura 6.8b) Vaciado de la muestra para el filtrado.	102
Figura 6.9a) Finalización del proceso de filtrado. Figura 6.9b) Residuos sólidos atrapados en el tamiz.	103
Figura 6.10a) Muestra final lista para ser vaciada. Figura 6.10b) Muestra final de 3 litros de agua marina.	103
Figura 6.11 Solución electrolítica.	105
Figura 6.12 Influencia del caudal en el rendimiento de RED. Fuente: Fabao, 2017. 105	
Figura 6.13 Celda Electrolítica construida en el Instituto de Ingeniería UNAM.	106
Figura 6.14a) Monitoreo de las pruebas de fugas del lado izquierdo y 6.14b) del lado derecho.	107
Figura 6.15 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 0 s.	109
Figura 6.16 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 0 s.	109
Figura 6.17 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 1 s a más.	110
Figura 6.18 Esquema del proceso de desalación al finalizar el tiempo programado de 1 hora.	110
Figura 6.19 Proceso de desalación de agua marina.	111
Figura 6.20a) Fuente de alimentación con 3.0 V. Figura 6.20b) Fuente de alimentación con 4.5 V. Figura 6.20c) Fuente de alimentación con 6.0 V.	112

Figura 6.21 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 3.0 V.	114
Figura 6.22 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 4.50 V.	115
Figura 6.23 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 6.0 V.	115
Figura 6.24 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 3.0 V.	116
Figura 6.25 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 4.5 V.	117
Figura 6.26 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 6.0 V.	118

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Cuadro técnico de IDAM Torre Vieja planta desalinizadora. Fuente: (Iagua., 2022).....	26
Tabla 2.2 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).	29
Tabla 2.3 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).	30
Tabla 2.4 Plantas desalinizadoras de agua instaladas en México por entidad federativa. Fuente: IDA (2007).	32
Tabla 2.5 Plantas desalinizadoras por instalarse en México. Fuente: IDA (2007).	33
Tabla 3.1 Tabla Comparación de procesos de desalación de agua de mar (APF – ITC S.A.). Fuente: (Potable, e. A., 2019).	47
Tabla 6.1 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 3.0 V.	107
Tabla 6.2 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 4.5 V.	108
Tabla 6.3 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 6.0 V.	108
Tabla 6.4 Parámetros de la Muestra de Agua Marina Antes de Recircularla en la Celda Electrolítica.	111
Tabla 6.5 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 3.0 V.	112
Tabla 6.6 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 4.50 V.	113
Tabla 6.7 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 6.0 V.	113

RESUMEN

Una de las preocupaciones más importantes que el hombre tiene en años recientes, es la escasez de agua dulce; la ONU alertó que la disminución de este líquido vital llevará, al menos, a una de cada cuatro personas a vivir en un país donde la falta de agua será crónica o recurrente para el año 2050. Se sabe que existen muchas investigaciones y proyectos alrededor del mundo, donde se estudia la forma de mitigar este importante acontecimiento que parece inevitable.

En este trabajo se presenta una investigación respecto del estado global de las plantas desaladoras de agua marina. Los países líderes son Estados Unidos de América, España, Arabia Saudita y Japón (IDA, 2007); además se indaga sobre los métodos que se utilizan para la desalinización de agua salada y especialmente en México. Así mismo, se presentan las ecuaciones generales para el cálculo teórico de desalación con membranas.

Se presentan también los resultados de un experimento de desalación con el método de electrodiálisis usando la tecnología de membranas. Se realizó la desalación de una muestra de agua marina extraída de la Costa de Oaxaca, específicamente de la Playa "Puerto Angelito", ubicada a 2 km del Aeropuerto Internacional de Puerto Escondido. Los resultados incluyen valores medidos de Conductividad y calculados para Salinidad.

CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

Nosotros mismos somos nuestro peor enemigo. Nada puede destruir la Humanidad, excepto la Humanidad misma.

Pierre Teilhard de Chardin

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El acceso al agua es uno de los grandes problemas de la humanidad y uno de los focos de conflicto más preocupantes en muchos lugares del planeta. Los recursos hídricos están repartidos de manera desigual y, a pesar de que la ONU establece el acceso al agua como uno de los Derechos Fundamentales de la Humanidad y es el protagonista del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 en la Agenda 2030, la escasez de agua en la actualidad afecta al 40% de la población mundial.

Los datos son reveladores; solo seis países atesoran casi el 50 % de los recursos hídricos mundiales, Brasil, Estados Unidos, Canadá, Rusia, India y China. Y en solo 5 ríos se acumula el 27 % de ese recurso hídrico, Amazonas, Congo, Ganges-Brahmaputra, Amarillo y Orinoco. Más allá de esta sobreabundancia, existen muchas zonas del planeta con un alarmante estrés hídrico en las que el consumo del agua es mayor que la velocidad a la que esta se repone.

En su ranking sobre los países con mayor escasez de agua, el World Resources Institute (WRI) advierte que la situación será más grave en el futuro. De hecho, cerca de una quinta parte de los países del mundo padecerán agudos recortes en el suministro de agua en 2040. El estrés hídrico es uno de los mayores problemas a los que nos enfrentamos.

Son múltiples los factores que causan la escasez hídrica que azota a millones de personas en todo el mundo. A pesar de que hay factores que influyen de forma natural, el hombre tiene un papel preponderante en el agravamiento de este problema. El crecimiento demográfico, la crisis climática, los conflictos armados y el vertido de sustancias tóxicas derivados de la actividad industrial, ponen en jaque la disponibilidad de recursos de agua para nuestro consumo.

Actualmente, los países pobres sufren especialmente las consecuencias de este problema global. No obstante, muchos países desarrollados se han ganado un lugar en esta lista que sirve como señal de alerta de la importancia de actuar inmediatamente.

Oriente Medio y toda la zona que tiene colindancia con el mar mediterráneo, el mar rojo y el golfo pérsico, sobresale como la región más vulnerable. Catorce de los treinta y tres países en esta área tienen altas probabilidades de enfrentarse a recortes en el suministro de agua. Entre ellos, hay nueve países que podrían sufrir fuertemente la escasez de agua: Bahrein, Kuwait, Palestina, los Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudí, Omán y el Líbano.

Hay otros países que muy probablemente experimentarán recortes en el suministro, entre ellos se encuentra Estados Unidos, China e India. Algunas provincias, como

el Suroeste Estadounidense o la región autónoma de Ningxia, en China, podrían enfrentarse a una escasez enorme.

Se contempla que el déficit pueda incrementar del 40 % al 70 % en 2040. Australia, Indonesia, Filipinas, Mongolia, Namibia, Sudáfrica, Botsuana, Perú, Chile y distintos países del norte de África también se enfrentan a un elevado riesgo de escasez de agua para 2040.

Este creciente problema, justifica el presente trabajo de investigación que busca contribuir en mitigar de manera oportuna la falta de agua para uso humano. Una de las formas más eficientes de afrontar este problema es fijar la vista en el casi 98 % del agua salada que conforma la Tierra y aprovecharla para abastecer a los lugares que más la necesitan convertida en agua limpia y lista para el consumo humano.

Se sabe que, con la técnica de la desalación, especialmente la desalación por ósmosis inversa, es posible tratar el agua marina en cantidades mayores; pero en este caso, el trabajo está enfocado al proceso de desalación por el Método de Electrodiálisis, en una zona en particular que se ha elegido por un bosquejo de investigación y también de manera personal, entonces se habla del Océano Pacífico.

1.2. Objetivos

De acuerdo con lo expuesto en el apartado anterior, los principales objetivos de este trabajo son:

1.2.1. Objetivos generales

- Determinar la conductividad y la salinidad del agua marina, en una zona en particular del Océano Pacífico, especialmente en la Costa del estado de Oaxaca.
- Fomentar el estudio de tratamiento de agua marina para el aprovechamiento humano.

1.2.2. Objetivo particular

Calcular la salinidad a partir de la conductividad eléctrica *antes* de someterla al proceso de desalación con el método de electrodiálisis, y *después* de haber pasado por este tratamiento, utilizando la celda electrolítica proporcionada por el Instituto de Ingeniería UNAM, así como también interpretar los resultados de la experimentación.

1.3. Alcance

Se utilizará agua marina extraída del Océano Pacífico en la costa de Oaxaca México, particularmente de Puerto Escondido Oaxaca, obteniendo una muestra de 6 litros de agua inalterada aplicando las técnicas para su protección, extracción y transporte. Cabe mencionar que el agua marina tiene los iones carbonatos (CO_3^{2-}) e iones sulfatos (SO_4^{2-}), pero el compuesto de interés para este trabajo es el Cloruro de Sodio (NaCl), ya que es más abundante.

1.4. Hipótesis

Se estima que, en el proceso de la experimentación con el Método de Electrodialisis, utilizando la tecnología de membranas, se observarán cambios en las mediciones de Conductividad Eléctrica, y, mayormente en el objetivo principal, que es la Salinidad, ya que estos dos parámetros están íntimamente relacionados.

CAPÍTULO II.

BOSQUEJO GENERAL DE LA DESALINIZACIÓN EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

Los números perfectos, como los hombres perfectos, son muy extraños.

René Descartes

2. BOSQUEJO GENERAL DE LA DEZALINIZACIÓN EN EL MUNDO Y EN MÉXICO

2.1. Definición de desalinización

Es la técnica de separación de agua o sal, de un volumen de agua salada. También se considera que es un proceso termodinámico que requiere de energía. Un tratamiento ideal de desalinización es considerado como un medio de separación reversible, en el cual las entradas y salidas del fluido están en las mismas condiciones de presión y temperatura, a pesar de que el calor y/o trabajo estén siendo aplicados.

La *desalinización o desalación del agua* consiste en un proceso de tratamiento del agua por el cual el agua de mar o agua salobre se convierte en agua dulce para poder suministrar a la población con mayores dificultades de acceso a ella.

2.2. ¿Cuánta agua hay en el mundo?

Desde el espacio, la imagen de la Tierra es un planeta 'azul' y es que el 70 % de su superficie está cubierta por agua y sólo 30 % es tierra firme. Sin embargo, el agua solo representa el 0.023 % del total de la masa del planeta. La disponibilidad de agua promedio anual del mundo es de aproximadamente 1.386 millones de km³, de los cuales el 97.5 % es agua salada y el 2.5 % es agua dulce; y de ese 2.5 % de agua dulce, sólo una pequeña parte es accesible para el consumo humano, dado que 99.7 % está congelada o en acuíferos.

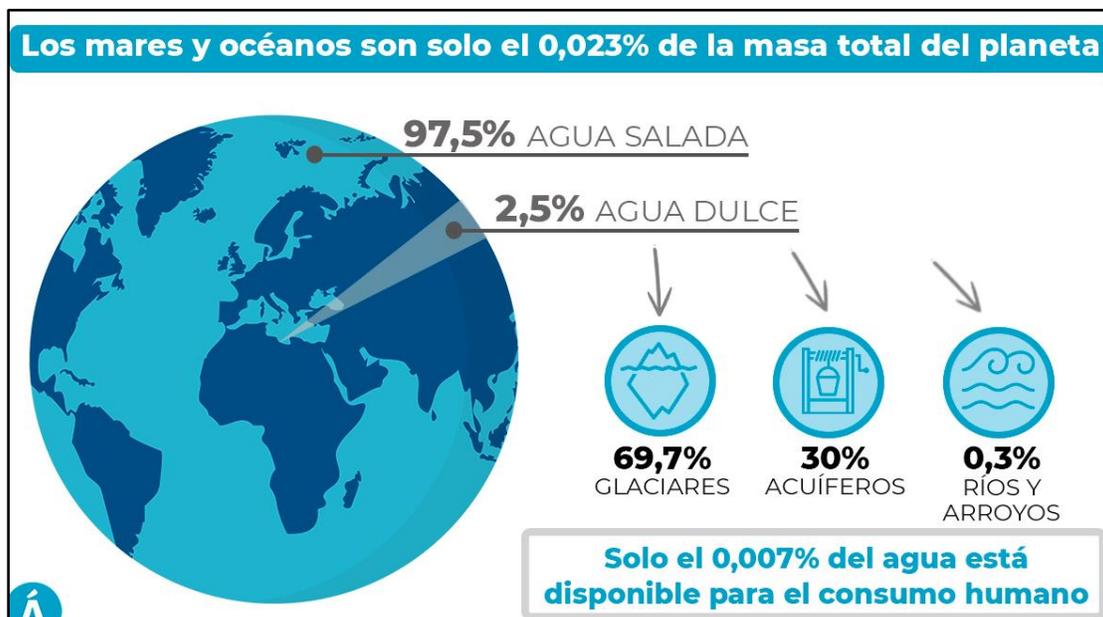


Figura 2.1 Esquema del planeta Tierra, agua salada, agua dulce y la superficie continental que lo conforma. Fuente: (FAO | ONU).

'Hay suficiente agua en el planeta como para alcanzar el sueño de que nadie se quede sin ella'

2.3. Plantas desalinizadoras más grandes en el mundo

Arabia Saudita es uno de los países pioneros en desalinización de agua de mar. En este país, cuatro de cada cinco litros que se consumen provienen de plantas desalinizadoras. Los siguientes países en la lista son Emiratos Árabes, Libia, Kuwait, Qatar, Estados Unidos, Japón y España.

Dos de las plantas desalinizadoras más grandes del mundo se encuentran en Israel, un país donde los recursos hídricos son escasos, limitados y se encuentran en continuo descenso. También es un país azotado por la escasez de lluvia, un problema en el que el cambio climático tiene mucho que ver. Además, como la mayoría de países del mundo, Israel demanda cada vez más agua debido al crecimiento demográfico.

A continuación, se muestran las plantas desaladoras de agua más grandes y de mayor capacidad en el mundo.

2.3.1. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Sorek



Figura 2.2 IDAM Sorek planta desalinizadora SWRO más grande y avanzada del mundo. Fuente: (Technologies, i., 2018).

2.3.1.1. Información General

Ubicación: Sorek, Israel.

Caudal: 624 000 m³/día (7 222 l/s).

Tecnología: Sistema de Ósmosis Inversa para Agua de Mar (SWRO).

Tipo de proyecto: Construir-Operar-Transferir (BOT).

Huella: 100 000 m² (10 ha).

Fecha de puesta en marcha: 2013.

Sorek establece nuevos referentes en la industria en cuanto a tecnología de desalinización, capacidad y costo de agua. Proporciona agua limpia y potable a más de 1.5 millones de personas, que comprenden el 20% de la demanda de agua municipal de Israel, lo que alivia la escasez de agua potable del país, a la vez que minimiza el impacto al medio ambiente terrestre y marino.

La electricidad para el funcionamiento de la instalación es proporcionada por un productor de energía independiente (IPP), que fue construido en el sitio por Delek Infrastructure.

2.3.1.2. Propósito de la planta desaladora

El proyecto de desalinización de Sorek es parte del plan maestro de desalinización lanzado por la Administración de Desalinización de Agua (WDA), una agencia gubernamental israelí, en el 2000.

El plan prevé la producción de aproximadamente 650 millones de metros cúbicos anuales para el año 2020, mediante la construcción de plantas de agua de mar a gran escala a lo largo de la costa del Mediterráneo.

La agencia ya ha construido las plantas de Ashkelon, Palmahim y Hadera, que tienen una capacidad de producción combinada de aproximadamente 290 millones de metros cúbicos al año.

La nueva planta abastece el 10% del consumo de agua potable del país y cerca del 20% del consumo doméstico de agua.

2.3.1.3. Liderazgo tecnológico

Diseño innovador que incorpora la instalación vertical de membranas de 16" en una planta de grandes dimensiones, lo que resulta en menor espacio utilizado, y, por lo tanto, ahorra costos. También usa el diseño de centro de presión de propiedad de IDE, con toma de doble línea y sistema ERS (sistema de recuperación de energía) para mayor eficiencia y consumo reducido de energía.

2.3.1.4. Precios competitivos

Establece un nuevo referente para el bajo costo del agua en proyectos BOT de agua desalinizada.

2.3.1.5. Responsabilidad ambiental

Minimiza el impacto en el medio ambiente marítimo, en la costa y en tierra gracias al hincado de largas tuberías de gran diámetro, elegante diseño estructural y tratamiento de lodos para garantizar una reducción en el consumo de energía y productos químicos.

Construida por la empresa española Sadyt, la desalinizadora más grande del mundo es la de Sorek, ubicada cerca de Tel Aviv, en Israel. Se inauguró en el 2013 y tiene una capacidad de tratamiento de agua de 624 000 m³/día. De esta cifra, 540 000 m³/día se utilizan para dar servicio al sistema de distribución de agua de Israel.

En contraste con la asociación popular de las plantas con un alto coste, esta planta permite de hecho un ahorro sustancial para el mercado de agua local. Además, su funcionamiento permite abastecer de agua a un país marcado por la escasez de agua.

Esta planta tuvo un coste de alrededor de 400 millones de dólares y su construcción se realizó en base al modelo construir-operar-transferir (BOT). El funcionamiento de la planta desalinizadora más grande del mundo se basa en la avanzada tecnología de desalinización por membrana de IDE.

Hasta la fecha, es la primera planta en utilizar membranas de 16" en arreglo vertical. Al disminuir la cantidad de recipientes a presión, colectores, equipos de control e instrumentación, Sorek opera de manera más eficiente, aumentando la capacidad de la planta y reduciendo su tamaño.

2.3.2. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Ashdod



Figura 2.3 IDAM Ashdod planta desalinizadora tiene uno de los pretratamientos de ultrafiltración más grandes del mundo. Fuente: (Technologies., i.,2018).

2.3.2.1. Información General

La planta de desalinización con Sistema de Osmosis Inversa de Agua de Mar (SWRO) en Ashkelon, Israel ha marcado recientemente un récord mundial en la producción y entrega de 1 000 millones de m³ de agua potable de alta calidad desde el comienzo de sus operaciones en el año 2005. Ashkelon cuando fue terminada, era la planta de desalinización más moderna y grande del mundo, con capacidad de hasta 330 000 m³ por día. La planta fija un nuevo punto de referencia, al lograr uno de los precios más bajos en el mundo de agua desalinizada, y recientemente en el 2010, se expandió en un 20 por ciento aproximadamente. Durante los últimos 9 años la planta ha cubierto en forma constante las necesidades de agua de más de 1 millón de habitantes.

Construida en 2013, la segunda planta desalinizadora más grande del mundo es IDAM Ashdod. Se ubica en Ashdod, la sexta ciudad más grande de Israel. Tiene una capacidad de producción de 384 000 m³ al día y se basa en el sistema de ósmosis inversa.

2.3.2.2. Competitividad

Una de las características que hacen única a esta planta es el pretratamiento de ultrafiltración que realiza. Se trata de un proceso de pretratamiento para aguas superficiales, agua de mar, aguas subterráneas, efluentes tratados biológicamente para su posterior tratamiento. Debido a las dimensiones de IDAM, se trata de una de las infraestructuras más grandes del mundo.

2.3.3. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Port Stanvac



Figura 2.4 IDAM Port Stanvac planta desalinizadora localizada en Australia en la localidad de Port Stanvac. Fuente: (Aquae.,2022).

2.3.3.1. Información General

Ubicación: Port Stanvac, al sur del área metropolitana de Adelaide.

Tecnología: Sistema de Ósmosis Inversa para Agua de Mar (SWRO).

Capacidad máxima: 100 gigalitros por año. La planta de última generación tiene la capacidad de entregar hasta 300 millones de litros de agua cada día (100 mil millones de litros al año), aproximadamente la mitad de las necesidades actuales de agua de Adelaide.

Término del proyecto: Construcción más 20 años de operación.

Horario de construcción: Completado y entregado el 12/12/12 (a tiempo y dentro del presupuesto original).

Costo capital: 1830 millones de dólares australianos.

Construcción: AdelaideAqua D&C Consortium formado por McConnell Dowell Constructors, Abigroup Contractors y ACCIONA Agua, es el responsable de la construcción de la planta.

Operaciones: AdelaideAqua Pty Ltd, sociedad participada a partes iguales por ACCIONA Agua y Trility Pty Ltd, operará y mantendrá la instalación de forma conjunta durante 20 años.

En tercer lugar, se encuentra la IDAM Port Stanvac localizada en Australia en la localidad de Port Stanvac a 30 Km de Adelaida, conocida por su Distrito central de negocios (CBD). Cuenta con una capacidad punta de 300.000 m³/día, que cubrirá el 50% del suministro de agua potable en toda la región. Esto soluciona los problemas de abastecimiento debido a los bajos niveles del río Murray, que ya no proporciona la cantidad necesaria de agua potable para abastecer toda la población, comercio, e industrias de esta región del sudeste de Australia.

2.3.3.2. Competitividad

Destaca por la incorporación de un novedoso sistema de pretratamiento mediante membranas de ultrafiltración y una configuración en doble etapa que optimiza el rendimiento energético de la instalación desaladora.

Los bastidores de osmosis inversa son impresionantes por su capacidad y eficiencia en la separación de sales disueltas y otras impurezas contenidas en el agua marina. Una vez desalada el agua es conducida a un sistema de remineralización, donde se le añade cal y sales con el objetivo de alcanzar un índice de Langelier próximo a cero.

Llama la atención la integración arquitectónica con el paisaje gracias a un diseño compacto y con criterios de sostenibilidad. El centro de visitas de la desaladora tiene una exposición acristalada y unas salas para recibir estudiantes y difundir conocimientos de ingeniería y tratamiento de aguas.

También es impresionante la enorme estación de bombeo de agua bruta, y el sistema de producción de energía renovable para suministrar electricidad a toda la desaladora.

2.3.4. Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) Torrevieja



Figura 2.5 IDAM Torrevieja planta desalinizadora localizada en España. Fuente: (Iagua., 2022).

2.3.4.1. Información General

Ubicación: Torrevieja, Alicante España.

Capacidad: 240 000 m³/día.

Procedimiento: Sistema de Ósmosis Inversa para Agua de Mar (SWRO).

Tipo de contrato: EPC y O&M (15 años).

Uso final del agua: Consumo humano e industrial.

Población: 1.6 millones de habitantes.

La Desaladora de Torrevieja es la instalación de mayor capacidad de producción con 240 000 m³/día de las programadas en el Plan Agua, así como la mayor de Europa y la segunda del mundo con la tecnología de ósmosis inversa.

En su diseño se han utilizado los últimos avances tecnológicos para la protección de las membranas de ósmosis inversa, así como para la reducción del consumo energético.

La planta se ha diseñado no sólo para producir un agua que cumpla la actual legislación en cuanto a abastecimiento, sino también con niveles de exigencia (boro < 0.5 mg/l) que permiten su uso en todo tipo de riegos agrícolas. El diseño de la instalación se ha completado con un avanzado estudio de integración paisajística con el entorno, edificios bioclimáticos e instalación de energía solar tanto térmica como eléctrica.

2.3.4.2. Características técnicas

- La planta desalinizadora de Torrevieja es la más grande prevista dentro del plan AGUA, con una capacidad diaria de producción de 240 000 m³/día (80 Hm³/año), ampliable a 360 000 m³/día. Actualmente será la mayor de Europa y la segunda del mundo con la tecnología de la Ósmosis Inversa.
- El destino del agua producida tendrá a cubrir el déficit de riego en la zona regable del transvase Tajo-Segura de 60 Hm³/año y un déficit de abastecimiento en la Vega Baja Oeste de 20 Hm³/año.
- En su diseño se han utilizado los últimos avances tecnológico encaminados a la protección de las membranas de Ósmosis Inversa, la reducción de los consumos energéticos, el cumplimiento de la legislación vigente en el sector del abastecimiento (presencia de boro <0.5 mg/l), la integración paisajística en el entorno y el control en el vertido de la salmuera.

Tabla 2.1 Cuadro técnico de IDAM Torrevieja planta desalinizadora. Fuente: (Iagua., 2022).

CUADRO TÉCNICO	
Estado actual	En construcción
Producción máxima	240 000m ³ /día
Población beneficiada	440 000 habitantes
Hectáreas de regadío beneficiadas	8 000 hectáreas
Proceso de desalación	Ósmosis Inversa
Nº de bastidores de Ósmosis Inversa	16
Nº de trenes de alta presión	16
Tipo de captación	Abierta mediante cajón de hormigón adosado al dique de Poniente del Puerto de Torrevieja.
Bombeo agua desalada	EB-I: 8 elementos de impulsión, EB-II: 7 elementos de impulsión.
Conducción de impulsión	Acero soldado helicoidalmente. 5.610 m de DN 1600 mm. 7.644 m de DN1400 mm. 3.002 m de DN1200 mm 5.005 m de DN1300 mm
Conducción de vertido	2.431 m de PRFV DN2000 mm. 1.250 m de PEAD DN2000 mm
Depósito regulador	1 de 15 000 m ³ . 1 de 3 650 m ³
Potencia total instalada	51.2 MW
Plazo de la concesión	15 años
Inversión realizada	300 millones de euros
Financiación de fondos europeos	55 millones de euros
Capacidad de distribución	
Metros cúbicos por día	240 000m ³ /día
Hectómetros cúbicos por año	80 hm ³ /año
Datos Energéticos	
Potencia eléctrica (Kw)	51.2 MW
Voltaje (Kv)	220 KV
Consumo de energía específico	4.7468 KWH/m ³
Configuración del pretratamiento	32 filtros abiertos 1 línea de bombas alta presión con 24 filtros cerrados +11 filtros de cartuchos 1 línea de recuperadores con 32 FCE+12 FC
Configuración de los Racks de ósmosis inversa	
Tipo de membrana	8" arrollamiento en espiral
Nº de pasos	2
Nº de etapas	2 etapas en el 2º paso
Tubos y membranas por paso y etapa	1º paso: 182 tubos 7= 1.1274 membranas. 2º paso, 1ª etapa: 24 tubos 7= 168 membranas. 2º paso, 2ª etapa: 12 tubos 7= 84 membranas
Configuración del postratamiento	Lechada de cal con saturador de cal + CO ₂ (+hipoclorito)

2.4. Países con más plantas desalinizadoras en el mundo

Los países que cuentan con mayor cantidad de plantas instaladas son los siguientes: Estados Unidos (34 % del total mundial), con 2 174 plantas, de las cuales el 72 % corresponde a OI; Arabia Saudita (32 %), con un total de 2 086 plantas, de las cuales un 65% corresponde a MSF; Japón (22 %), con un total de 1 457 plantas, de las cuales un 90% corresponde a OI; España (12 %), con 760 plantas, de las cuales el 90% corresponde a OI (figura 2.7). Entre los países que tienen entre 100 y 300 plantas están Libia, India, China, Australia, Argelia, el Reino de Baréin y la Sultanía de Omán (IDA, 2007).

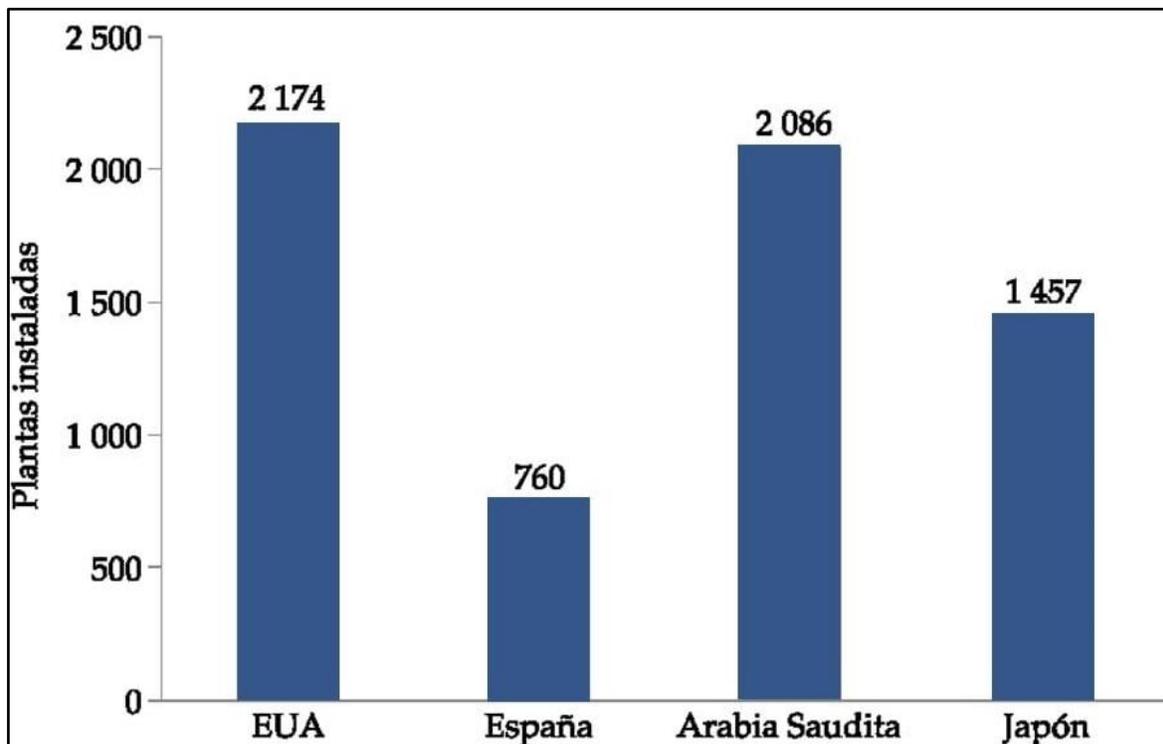


Figura 2.6 Países con más plantas desaladoras. Fuente: IDA (2007).

Por otro lado, el mundo cuenta actualmente con más de 18 000 plantas en más de 150 países. La desalinización se está convirtiendo en una de las principales fuentes de agua potable. Más de 300 millones de personas dependen de estas plantas para fines municipales, industriales y agrícolas. En la actualidad, alrededor de la mitad de toda el agua desalinizada se produce en Medio Oriente y África del Norte.

En los últimos años, América Latina y el Caribe (ALC) se convirtió en uno de los mayores mercados emergentes de desalinización. Desde 2020, en el continente existen 30 plantas y planea invertir más de US \$25 millones en proyectos futuros. Chile, país que ya cuenta con 18 plantas establecidas, tiene previsto construir la mayor planta desalinizadora alimentada por energía solar de toda América Latina en el desierto de Atacama, para abastecer la demanda de agua para la minería y el consumo humano. Perú utiliza el agua de sus cinco plantas para fines agrícolas,

industriales y de consumo humano. Existen plantas también en México (5), Colombia (2) y Argentina (1).

No obstante, la región está lejos de haber alcanzado el acceso universal al agua potable. De acuerdo a un informe de 2010, por año en ALC más de 12 000 niños y niñas menores de 5 años, mueren a causa de enfermedades diuréticas tras haber consumido agua contaminada. De hecho, a pesar de que ALC alberga a más del 30 % de los recursos de agua dulce del planeta y solamente el 8 % de la población mundial, muchos países aún sufren escasez de agua. La sequía extendida en América Central fomenta la emigración masiva. En México, la población sufre con frecuencia el desabastecimiento de agua, especialmente en el sudeste del país. Entre 2012 y 2015, Brasil sufrió la peor sequía en casi un siglo. La mayor reserva de agua de São Paulo, una ciudad con 22 millones de habitantes, perdió el 75 % de su capacidad entre 2014 y 2015. Y la lista continúa...

Aún sin la presión adicional que aportan las sequías, una familia de bajos recursos típicamente paga entre 1.5 y 2.8 veces más por el agua que sus contrapartes más favorecidas. Con frecuencia, las comunidades rurales cuentan con camiones de agua y agua embotellada, ya que no están conectadas a las redes de agua corriente. En toda América Latina y el Caribe, 77 millones de personas aún carecen de acceso a agua potable.

A continuación, se muestra un mapa de la distribución de las plantas desaladoras en todo el planeta.

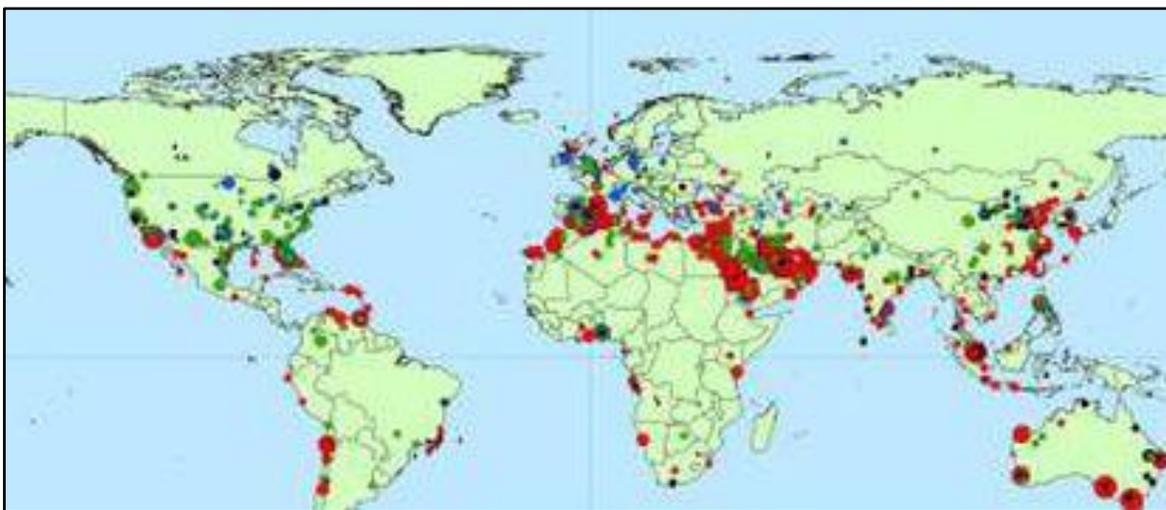


Figura 2.7 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).

Ahora, en las tablas 2.2 y 2.3 se presentan algunas de las plantas por país, considerando el nombre asignado, la producción por día de cada desaladora, la conversión y el año que se construyó o que estaba en construcción.

Tabla 2.2 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).

Nombre	País	Producción (m ³ / día)	Conversión	Año
Djerba	Tunez	50.000	45%	Construcción
Radomiro Tomic	Chile	72.580	47%	Construcción
Sierra Gorda	Chile	9.000	50%	Construcción
El Morro	Chile	64.000	45%	Fase Ingeniería
Kumkoy	Chipre	24.200	41%	2015
Al Ghubrah	Oman	190.000	42%	2015
Busan Gijang	korea	45.460	44%	2015
Jorf Lasfar	Marruecos	75.800	45%	2015
Tortola	Islas Virgenes	10.400	45%	2015
Carlsbad	USA	189.000	49%	2015
Al-Zawrah III	EAU	45.500	40%	2014
Larnaca (Ampliación)	Chipre	60.000	46%	2014
Gwanyang	Korea	30.000	49%	2014
Ensenada	México	21.600	50%	2014
Al-Zawrah II	EAU	41.000	40%	2013
Harley – San Thomas	Islas Vírgenes	12.490	40%	2013
Ashdod	Israel	384.000	45%	2013
Magtaa	Argelia	550.000	45%	2013
Tenes	Argelia	200.000	45%	2013
Curacao	Ant Holandesas	25.000	40%	2012
Candelaria	Chile	45.000	45%	2012
Cap Djinet	Argelia	100.000	45%	2012
Teclém – Hounaine	Argelia	200.000	45%	2012
Victoria – Melbourne	Australia	450.000	46%	2012
Adelaida	Australia	300.000	48%	2012
Al Dur	Oman	218.000	40%	2011
Caofeidian	China	50.000	45%	2011
Fouka	Argelia	120.000	45%	2011
Mostaganem	Argelia	200.000	45%	2011
Tiemcen Souk Tlata	Argelia	200.000	45%	2011
Southern	Australia	306.000	46%	2011
Kaust	Arabia Saudi	40.000	38%	2010
Hamriyah	EAU	90.920	40%	2010
Hadera	Israel	347.942	41%	2010
Sydney	Australia	250.000	45%	2010
Beni Saf	Argelia	200.000	47%	2010
Sharm EL- Sheikh	Egypt	18.000	30%	2009
Rabigh	Arabia Saudi	192.000	40%	2009
Jeddah III	Arabia Saudi	240.000	40%	2009

Tabla 2.3 Plantas desaladoras en el mundo. Fuente: IDA (2007).

Nombre	País	Producción (m ³ / día)	Conversión	Año
Sur	Oman	80.000	40%	2009
North Side Water	Islas Cayman	9.000	42%	2009
Tianjin	China	100.000	43%	2009
Point Lisas	Trinidad	151.400	50%	2009
Barka II	Oman	123.500	39%	2008
Shoiba Barge	Arabia Saudi	52.000	40%	2008
Shuwaikh	Kuwait	136.380	40%	2008
Gold Coast	Australia	125.000	41%	2008
Hamma	Argelia	200.000	42%	2008
Layyah, Sharjah	EAU	30.000	42%	2008
Skikda	Argelia	100.000	45%	2008
Shuaibah	Arabia Saudi	150.020	39%	2007
Al – Zawrah I	EAU	27.300	40%	2007
Tampa Bay, Florida	USA	108.820	42%	2007
Power Seraya	Singapur	10.000	42%	2007
Honaine	Argelia	200.000	45%	2007
Madinat Yanbu Al – Sinaiyah	Arabia Saudi	50.400	39%	2006
Blue Hills, Nassau	Bahamas	27.252	43%	2006
Palmachin	Israel	110.000	42 - 49%	2007
Antofagasta	Chile	52.000	48%	2006
Los Cabos	México	22.000	49%	2006
Tuas I	Singapur	136.000	39%	2005
Tanjung Jati	Indonesia	10.900	40%	2005
Ashkelon	Israel	330.000	41%	2005
Perth	Australia	143.700	43%	2005
Minera Escondida I	Chile	40.000	50%	2005
Fukuoka	Japón	50.000	57%	2005
Fujairah I	EAU	170.470	43%	2001
Arica	Chile	18.000	48%	1998
Dhekelia	Chipre	60.000	50%	1997
Eilat	Israel	20.000	50%	1997
Pembroke II	Malta	8.800	45%	1994
Pembroke I	Malta	17.600	45%	1991
Cirkewwa	Malta	18.600	42%	1989
Ghar Lapsi II	Malta	4.500	33%	1985
Ghar Lapsi I	Malta	20.000	33%	1983
Marsa Alam	Egipto	3.000	30%	---
Fujairah	EAU	4.500	35%	---
Ghallilah, Ras Al Khaimah	EAU	68.130	40%	---
Mundra (Coastal Gujarat)	India	25.200	40%	---

2.5. La desalación en México

Actualmente el IMTA cuenta con el inventario nacional de desaladoras actualizado. Existen en México 320 sitios donde están instaladas desaladoras, y en éstos hay 435 plantas. Esta infraestructura se halla distribuida en todo el país. El estado con el mayor número de desaladoras es Quintana Roo, con 124 unidades; le sigue Baja California Sur, con 71. Este último cuenta con la planta municipal más grande del país, en los Cabos, que produce 200 l/s de agua potable (17 280 m³/día) y abastece a una parte de Cabo San Lucas. Es una concesión por 20 años a una empresa española, y el costo por m³ actualmente está alrededor de los diez pesos con cincuenta centavos.

Podemos preguntarnos qué se obtiene como resultado de este proceso, y qué se hace con los desechos o residuos que quedan después de la desalación. Pues bien: tanto de los procesos térmicos como de los de membrana se obtienen dos productos: el agua destilada o baja en sales, a la que es necesario darle un postratamiento para que sea apta para consumo humano y no provoque problemas de corrosión en las redes de distribución, y la salmuera, que es el concentrado de sales de estos procesos y es de tal modo un desperdicio con una concentración doble de sales, la cual debe ser desechada adecuadamente. Lo anterior quiere decir que, si tengo agua de mar, cuya concentración es de 35 000 ppm de sal, al desalarla voy a tener un agua baja en sales, menor a 100 ppm, y que tendremos además el rechazo o salmuera, con una concentración de 70 000 mg por litro.

Los residuos de las plantas desaladoras se desechan en dos formas: si existe terreno suficiente, se llevan a lagunas de secado, donde el agua se evapora; la sal que queda es confinada, ya que tiene químicos (antiincrustantes) que no permiten su utilización para el consumo humano. El método de disposición de salmuera más común es su depósito en el océano, por medio de difusores ubicados mar adentro. El mar diluye en segundos las altas concentraciones de sal que por ese medio se le agregan. Es necesario no hacer estas descargas de salmuera en sitios muy frágiles bióticamente, como los bancos de coral. Un dato curioso es que la sal que hay ya en los mares del mundo es tanta, que si la extrajéramos en su totalidad cubriríamos con ella todos los continentes con una capa de 1.5 m de alto.

2.6. Plantas desalinizadoras en México

En la tabla 2.4 se presenta información con las plantas instaladas en México, por estado.

Tabla 2.4 Plantas desalinizadoras de agua instaladas en México por entidad federativa. Fuente: IDA (2007).

Entidad federativa	Sitios con plantas desaladoras	Número de unidades	% nacional	Operan		Proceso					Capacidad en m ³ /día
				Sí	No	OI	C V	MS F	S	D	
Baja California	23	38	8.74	24	14	26	7	2	3	0	51 938
Baja California Sur	71	73	16.78	53	20	63	6	0	4	0	36 971
Campeche	8	19	4.37	14	5	16	2	0	1	0	5 456
Coahuila	31	33	7.59	23	10	30	1	0	1	1	7 668
Colima	17	18	4.14	2	16	17	1	0	0	0	2 856
Edo. De México	3	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	7 000
D.F.	14	17	3.91	12	5	15	0	0	1	1	95 471
Durango	26	26	5.98	13	13	26	0	0	0	0	868
Guerrero	6	6	1.38	3	3	6	0	0	0	0	2 355
Jalisco	3	4	0.92	3	1	3	0	0	1	0	2 865
Morelos	2	21	4.83	21	2	20	1	0	0	0	110
Nuevo León	5	5	1.15	5	1	5	0	0	0	0	2 847
Oaxaca	1	4	0.92	4	1	4	0	0	0	0	14 256
Quintana Roo	79	124	28.51	73	51	121	2	0	1	0	53 339
San Luis Potosí	1	1	0.23	1	0	1	0	0	0	0	60
Sonora	16	22	5.06	15	7	17	2	0	1	2	9 349
Tamaulipas	4	4	0.92	2	2	4	0	0	0	0	5 100
Veracruz	9	15	3.45	11	4	13	1	0	0	1	12 167
Yucatán	1	1	0.23	1	2	1	0	0	0	0	700
Total nacional	320	435	100%	282	137	392	23	2	13	5	311 377

Nomenclatura: OI: ósmosis inversa; MVC: comprensión mecánica de vapor; MSF: flash multietapa; S: solar; D: destilación. Fuente: IDA (2007).

Por otro lado, hasta el año 2007, se contemplaban las siguientes plantas por instalarse en algunos estados, en la tabla 2.5 se puede observar con más detalle.

Tabla 2.5 Plantas desalinizadoras por instalarse en México. Fuente: IDA (2007).

Lugar	Producción m ³ /día	Tecnología	Calidad del agua	Empresa
Cancún, Quintana Roo	1 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	1 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Degrémont
Cancún, Quintana Roo	568	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Cancún, Quintana Roo	550	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Catalonia Hotel, Quintana Roo	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Chileno Bay, BCS	4 000	Ósmosis inversa	Agua de mar	Bekox / VWS Ibérica
Gran Gala Hotel, Quintana Roo	1 134	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Ixtapa, Guerrero	327	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE osmonics
La Paz, BCS	120	Destilación múltiple efecto	Agua de mar	IDE
Puerto Peñasco, Sonora	870	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Mazatlán, Sinaloa	768	Destilación múltiple efecto	Agua de mar	IDE
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 636	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 364	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 091	Ósmosis inversa	Agua salobre	GE Water
México	1 091	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE Water
Los Cabos, BCS	230	Ósmosis inversa	Agua de mar	VWS México
Los Cabos, BCS	460	Ósmosis inversa	Agua de mar	VWS México
Puerto Vallarta, Jalisco	1 635	Ósmosis inversa	Agua de mar	GE osmonics
Puerto Peñasco, Sonora	401	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México
Rivera Maya, Quintana Roo	150	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Rivera Maya, Quintana Roo	273	Ósmosis inversa	Agua salobre	STS de México
Tuxpan, Veracruz	280	Ósmosis inversa	Agua de mar	Mitsubishi
Puerto Vallarta, Jalisco	500	Ósmosis inversa	Agua de mar	STS de México

2.6.1. Producción y usos del agua desalinizada

Como bien se mencionó anteriormente, hay miles de plantas instaladas para desalinizar agua, con una producción de 25 millones de m³/día; entre las tecnologías más utilizadas para desalinización se tiene la ósmosis inversa con un 50%, MSF con 33%, MED con 7%, la nano filtración y electrodiálisis con el 4% y el EDI con un 1%.

La capacidad mundial de desalación ha crecido. En 1980, la capacidad de producción era de 950 000 m³/día y en 2006 fue de 3 350 000 m³/día, esto se puede apreciar en la gráfica de la figura 2.8.

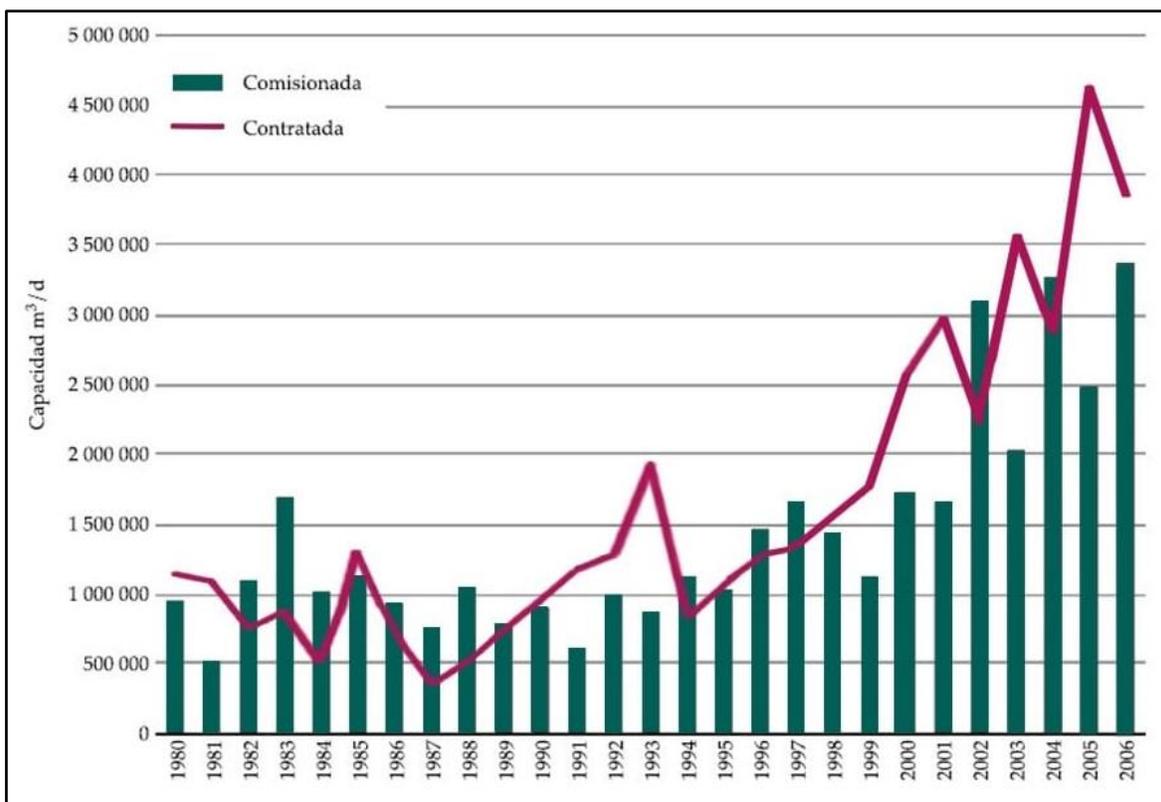


Figura 2.8 Capacidad mundial de desalación en m³/día. Fuente: IDA (2007).

Como fuente de abastecimiento al proceso, se tiene que la más utilizada es la proveniente de agua de mar, con un 66% y el agua salobre con un 22%. Por otra parte, los sectores con más uso del agua producto son el municipal, con un 66%, y el industrial, con un 23%, en la siguiente gráfica de la figura 2.9, se puede observar con más detalle.

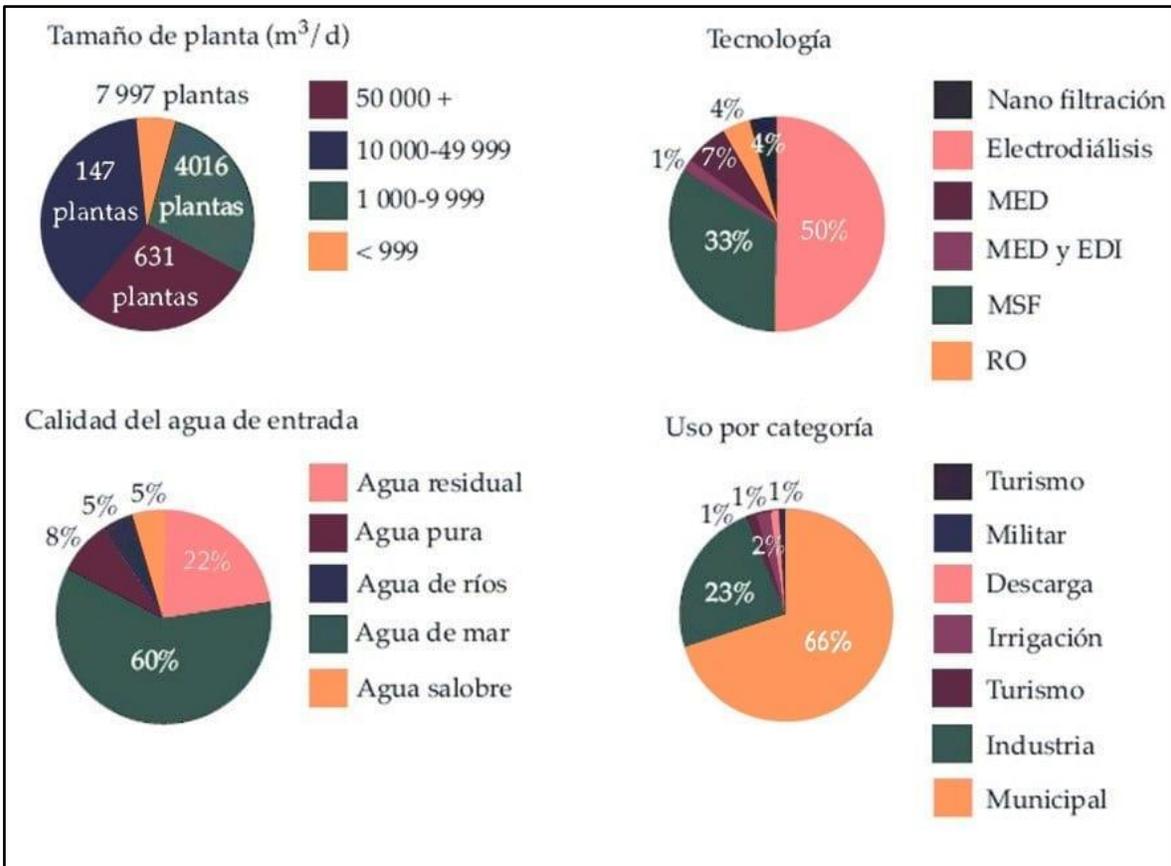


Figura 2.9 Perfil mundial de desalinización. Fuente: IDA (2007).

Las aguas desaladas se pueden usar para uso agrícola, industrial o de consumo humano. Los requerimientos para el funcionamiento de las aguas desaladas de uso industrial o agrícolas son mínimos para el agua comparado con los requisitos asociados al agua potable. Por tanto, casi cualquier método de los hablados puede utilizarse para obtener aguas desaladas con uso agrícola e industrial.

En el siguiente esquema (figura 2.10) se presenta la producción y costo.

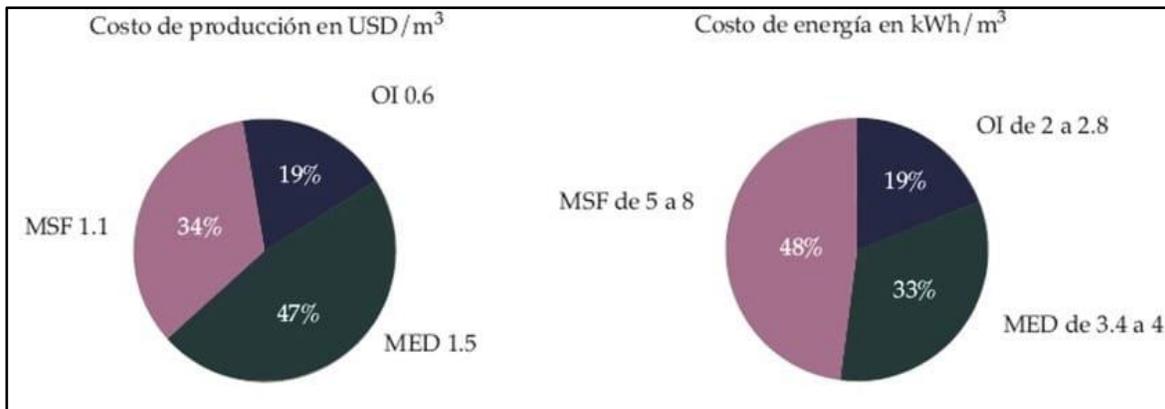


Figura 2.10 Costo de producción y consumo energético de procesos de desalinización. Fuente: IDA (2007).

CAPÍTULO III.

TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS PARA LA DESALACIÓN DE AGUA MARINA.

*La materia, aunque divisible en grado extremo, no es infinitamente divisible. Es decir, debe haber algún punto más allá del cual no podemos ir en la división de la materia...
eh elegido la palabra "átomo" para estas partículas últimas.*

John Dalton

3. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS PARA LA DESALACIÓN DE AGUA MARINA

3.1. Acerca de la tecnología de membranas

Las membranas son básicamente barreras físicas que permite la separación de dos fluidos, haciendo posible el movimiento de diferentes componentes a través de dicha barrera física por algún método selectivo, posibilitando que algún componente o componentes pasen a través de ella, y restringiendo el paso de otros componentes.

La tecnología de membranas aplicada al tratamiento de aguas ha sido de vital importancia en las últimas décadas. Ha permitido la expansión de las tecnologías de desalación y reutilización de agua, además de otras aplicaciones tecnológicas a nivel industrial para la obtención de agua tratada procedente de aguas subterráneas, superficiales o residuales para el abastecimiento, riego y otros usos municipales e industriales.

Tecnología de membranas se refiere al término genérico que engloba una serie de procesos de separación diferentes, pero que tienen en común el uso de una membrana que actúa como filtro específico, dejando pasar unos componentes mientras retiene otros. Por lo tanto, los procesos de membranas se pueden utilizar para concentrar o purificar una solución o para fraccionarla.

En el ámbito del tratamiento de aguas, las primeras membranas comerciales desarrolladas en los años 20 del siglo XX fueron utilizadas para la descontaminación bacteriológica. Pero no es hasta los años 60 del siglo XX cuando el uso de las membranas comienza a ver otros horizontes, con la invención de Sidney Loeb y Srinivasa Sourirajan de la membrana semipermeable anisotrópica que permite los usos comerciales de la tecnología de ósmosis inversa.

Estas membranas estaban formadas por una película ultrafina dispuestas sobre un soporte microporoso que proporcionaba resistencia mecánica. Tanto las membranas, como los procesos, han ido madurando y ya a partir de los años 90, las distintas tecnologías de membranas son procesos bastantes establecidos tanto en el ámbito de la desalación, como en el tratamiento de aguas residuales para su posterior reutilización.

3.2. Generalidades de los procesos de separación con membranas

En los procesos de separación con membranas la presión suministrada permite el rechazo de los constituyentes disueltos en el agua de alimentación del sistema. Las membranas son permeables al agua, pero no a las sustancias presentes en ella, por esto son rechazadas y removidas. En la industria del agua potable estos procesos se utilizan para desalinización, ablandamiento, remoción de sólidos orgánicos disueltos, color y bacterias. Los procesos se clasifican de acuerdo con el tipo de membrana en: Ósmosis Inversa (OI), que impiden el paso de bacterias, protozoos, algas, virus, materia orgánica disuelta, iones divalentes y monovalentes

y su estructura no presenta poros; Nano Filtración (NF), cuyo tamaño de poro es aproximadamente de 0.001 μm , que a diferencia de las membranas de OI no retiene las especies monovalentes como sodio y cloro; Ultra Filtración (UF), con tamaño de poro de 0.01 μm y microfiltración (MF) de 0.1 μm , las cuales, a diferencia de las membranas anteriormente mencionadas, solo permiten la remoción de bacterias y sólidos suspendidos.

Los materiales más utilizados en la fabricación de membranas de OI y NF son los derivados celulósicos y derivados de poliamida. El acetato de celulosa (material comercial) no tolera temperaturas superiores a 30 °C y sufre procesos de hidrólisis a pH menores a 3 y superiores a 8 unidades, son susceptibles a la degradación biológica y a concentraciones de cloro libre. Las poliamidas resisten la degradación biológica, funcionan de manera estable en valores de pH entre 3 y 11 unidades, y no se hidrolizan en agua. Estas membranas de poliamida, bajo condiciones similares de presión y temperaturas pueden producir un mayor flujo de agua y un alto rechazo de sales en comparación con las de acetato de celulosa, sin embargo, las membranas de poliamida son más susceptibles al ensuciamiento y no toleran ninguna concentración de cloro libre. Las membranas se fabrican comúnmente en una configuración enrollada en espiral, las cuales son mayormente utilizadas en el tratamiento de aguas para consumo humano, provenientes de aguas subterráneas o fuentes superficiales, o en configuración de fibra hueca.

En la fabricación de membranas de UF y MF se utilizan comúnmente polímeros orgánicos, sin embargo, en relación con el uso de las membranas de polisulfona, son las más utilizadas, debido a su alta tolerancia a los cambios de pH y a que pueden soportar temperaturas hasta de 75 °C. Las membranas fabricadas con polímero de polivinilidenefluorida (PVDF) toleran un rango de pH de 2-11 unidades y las de polipropileno (PP) tienen tolerancia a valores de pH en el intervalo de 2-13 unidades y son especiales para procesos de MF. Por otro lado, las de polietersulfona (PES) y polisulfona (PS), que trabajan de manera eficiente a valores de pH entre 2-13 unidades, son ideales para UF. Por último, las membranas de fibra hueca son la configuración más común para aplicaciones de UF y MF.

3.2.1. Funcionamiento de una membrana

Para que una membrana funcione y la separación pueda llevarse a cabo, la membrana debe ser sensible a una o varias propiedades moleculares o físico-químicas de los componentes. No obstante, todos los procesos de membranas cuentan con una corriente de alimentación, dividida en dos partes:

1. **El permeado o filtrado**, que es el fluido que ha pasado a través de la membrana y que por lo tanto es más rico en las sustancias con mayor tendencia a pasar a través de ella.
2. **El rechazo o concentrado**, que es el fluido en el que se recogen todas las sustancias que no atraviesan la membrana.

Para que se pueda producir el transporte de componentes a través de la membrana es necesaria la acción de una fuerza impulsora sobre la corriente de alimentación. Esta fuerza impulsora puede ser de distintos tipos, como por ejemplo de presión, concentración, temperatura o potencial eléctrico.

3.2.2. Tipos de membranas

Si bien no existe una única clasificación de los distintos tipos de membrana, sí existen distintos tipos de criterios para poder clasificarlas, lo que ayuda a comprender mejor el funcionamiento de los procesos de membranas para el tratamiento de agua.

Las membranas están fabricadas con materiales, como, por ejemplo:

- Poliméricos
- Cerámicos
- Metálicos

En seguida se considera un orden de manera general:

1. Según su naturaleza:

a) Membranas naturales:

- i.* Biológicas.
- ii.* No biológicas.

b) Membranas sintéticas:

- i.* Inorgánicas: metálicas o cerámicas.
- ii.* Poliméricas.
- iii.* Líquidas: de volumen, emulsión.
- iv.* Compuestas: por capas, por inclusión o por mezcla de polímeros.

2. Según su estructura:

a) Estructura microscópica:

i. Según su porosidad:

- ✓ Porosas: muy similar en estructura y función a un filtro convencional. Tiene una estructura rígida y muy ligera, una distribución aleatoria y poros interconectados. La separación es principalmente en función del tamaño molecular y la distribución de tamaño de poro. La fuerza impulsora responsable del flujo de permeado es una

diferencia de presión. Se utilizan habitualmente en microfiltración y ultrafiltración.

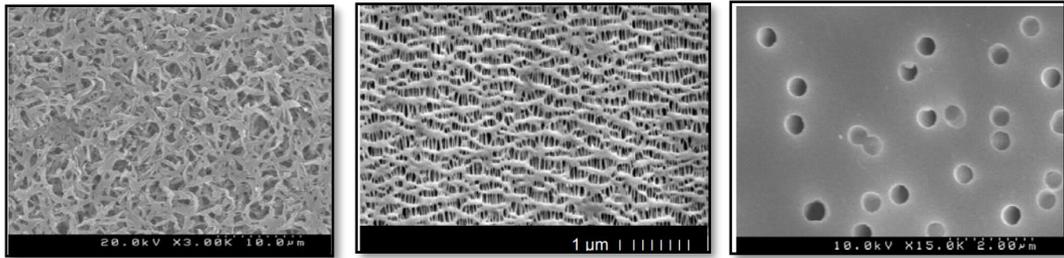


Figura 3.1 Membranas microscópicas porosas. Fuente: (Freeman, A. S., s.f.).

- ✓ Densas/no porosas: Estructuras sin poros que están formadas por una película densa a través de la que las sustancias permeantes son transportadas por difusión bajo un gradiente de presión, concentración o eléctrico. Los procesos que utilizan este tipo de membranas son la ósmosis inversa y la nanofiltración.

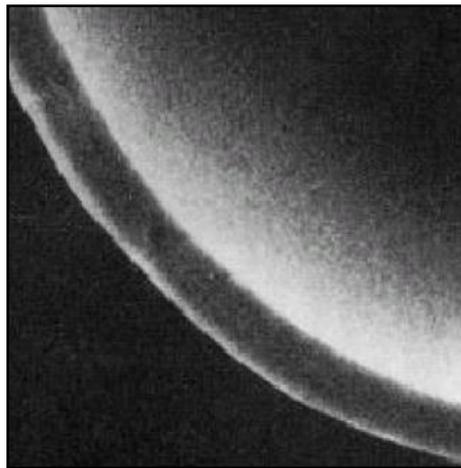


Figura 3.2 Membranas microscópicas porosas. Fuente: (Freeman, A. S., s.f.).

ii. Según su configuración:

- ✓ Simétricas: muestran una composición y estructura física uniformes en el corte transversal y se caracterizan porque presentan la misma resistencia al flujo a lo largo de toda la membrana. Este tipo de membrana puede ser porosa,

densa y cargada eléctricamente (esta se usa en electrodiálisis).

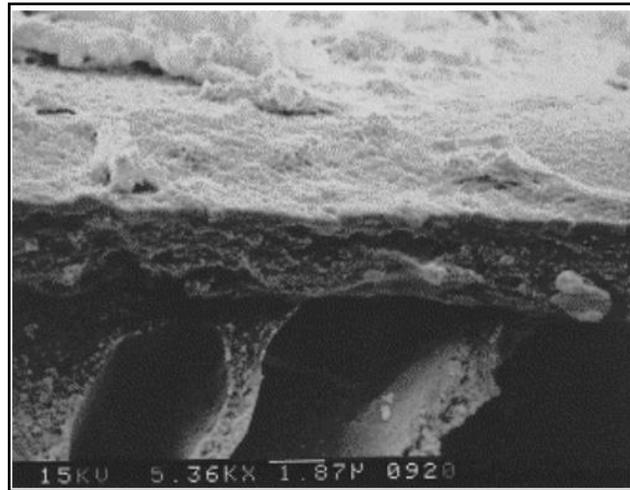


Figura 3.3 Membrana simétrica. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).

- ✓ Asimétricas (o anisotrópicas): constituidas por estructuras laminares o tubulares donde el tamaño de poro, la porosidad o la composición de la membrana cambia a lo largo de su espesor. La ventaja principal es que se obtienen mayores flujos.

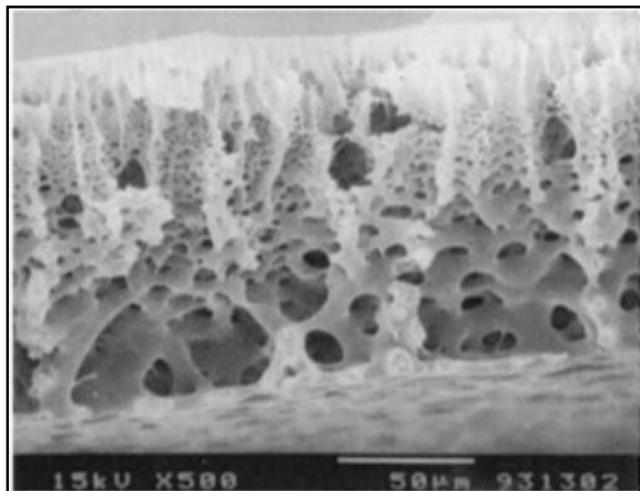


Figura 3.4 Membrana asimétrica. Fuente: (Freeman, A. S. ,s.f.).

- b)** Estructura macroscópica (o configuración de membranas): se refiere a la geometría de la membrana y su posición en el espacio en relación con el flujo del fluido de alimentación y del permeado.

- i) Laminares o de lámina plana: se colocan en capas horizontales, en placas similares a un filtro prensa, separadas por espaciadores permeables que dirigen el flujo. Presentan una baja relación superficie/volumen de filtrado. Se requiere una filtración preliminar para eliminar los sólidos en suspensión y la membrana debe estar sujeta.

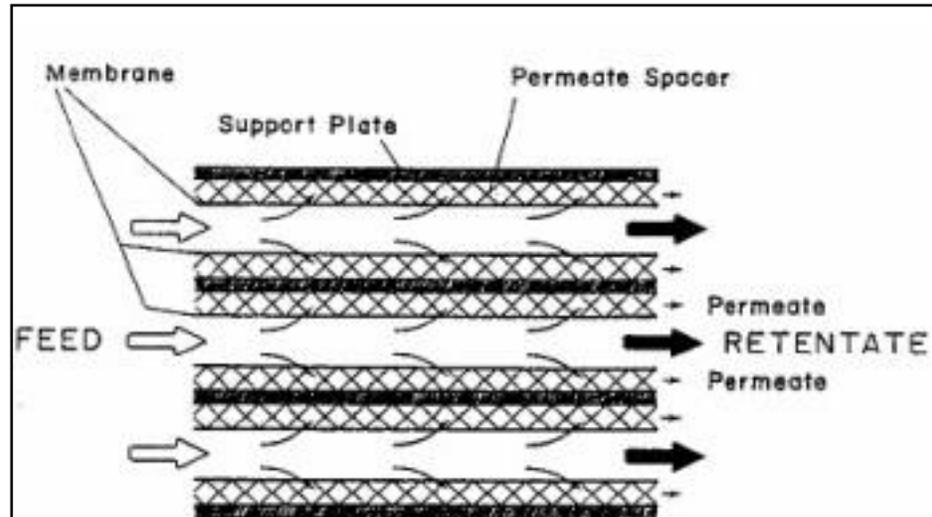


Figura 3.5 Esquema de un módulo de membrana tipo placa típico. El canal de alimentación también puede tener un espaciador (no mostrado). Fuente: (Román, M. G., 2009-2010.Z).

- ii) Tubulares: se colocan en el interior de carcacas cilíndricas que actúan como soporte y que contienen un número variable de membranas. Estos módulos no requieren filtración previa y pueden regenerarse químicamente, mecánicamente o con agua a presión.

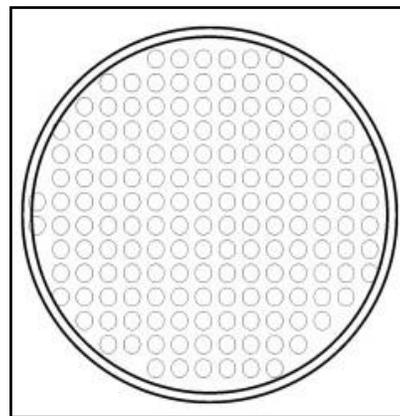


Figura 3.6 Esquema de una membrana estructura microscópica tubular. Fuente: (Berk, Z., 2009).

- iii) De arrollamiento en espiral: consiste en enrollar un conjunto de membranas planas separadas entre sí por capas de tejidos de distinta naturaleza que funcionan como transportadores y generadores de turbulencia de las disoluciones de alimentación y permeado. Consigue aumentar la superficie de trabajo y reducir el coste energético, pero son más difíciles de limpiar. Es la más establecida en plantas desaladoras de ósmosis inversa.

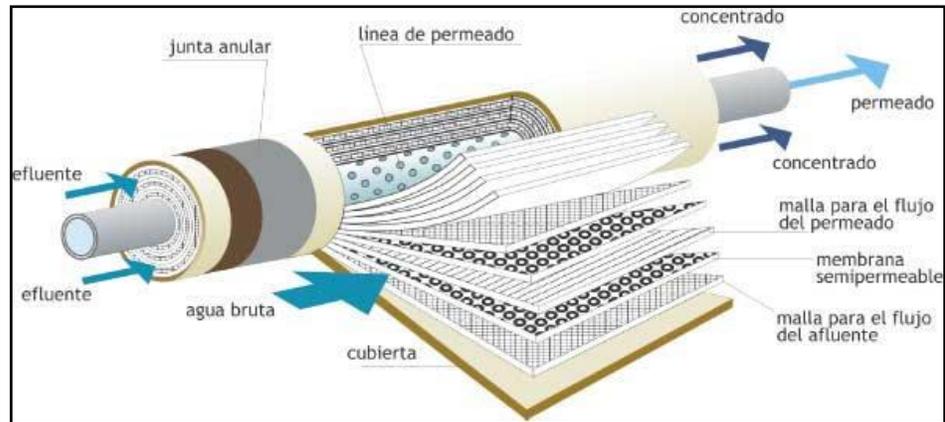


Figura 3.7 Membrana de arrollamiento espiral. Fuente: (Potable, e. A., 2019).

- iv) De fibras huecas: consiste en una unidad integrada en la que fibras, muy delgadas, se insertan por ambos extremos de un soporte. Son muy sensibles al ensuciamiento y que la manipulación de los haces de fibras resulta muy delicada.

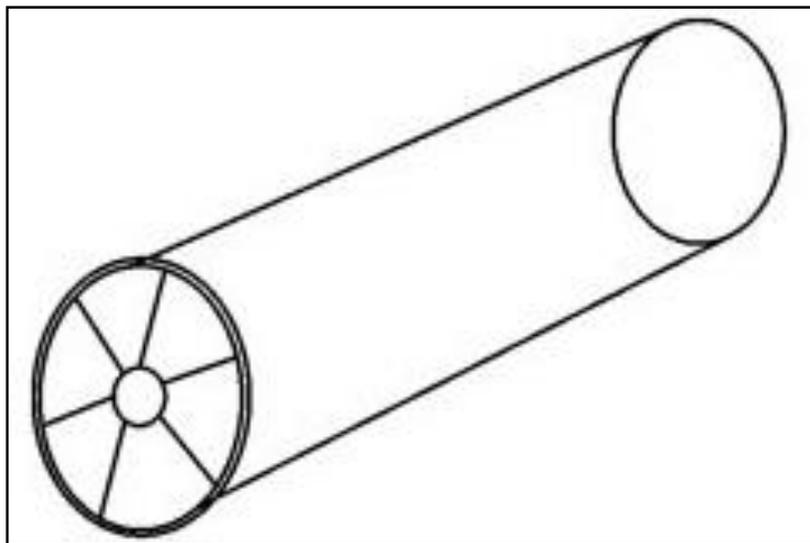


Figura 3.8 Membrana de fibra hueca. Fuente: (Berk, Z., 2009).

3.2.3. Características de la configuración de membranas

Las propiedades ideales de las configuraciones de membrana de tratamiento de agua son:

- ✓ Compacidad.
- ✓ Baja resistencia al flujo tangencial.
- ✓ Distribución uniforme de la velocidad sin regiones muertas.
- ✓ Alto grado de turbulencia del lado retenido para minimizar el ensuciamiento y ayudar a la transferencia de masa.
- ✓ Fácil limpieza y mantenimiento.
- ✓ Bajo costo unitario.

3.3. Plantas desalinizadoras en el mundo con membranas

3.3.1. La desalinización en el mundo

El agua y la energía son recursos estrechamente vinculados, de ellos depende el crecimiento económico, geográfico y social de la humanidad. En el mundo existen muchas plantas de desalinización en operación, pero los costos de capital y el consumo energético son elevados. Por ello, con el objetivo de aumentar la eficiencia de los sistemas, reducir los costos y mejorar la producción de agua dulce, se desarrollan numerosas investigaciones en el área.

Por otro lado, la empresa IDE especialista en desalinización, tratamiento de agua industrial, ha diseñado y construido la mayoría de las plantas de desalinización a gran escala del planeta, incluyendo la planta más grande y avanzada del mundo en Sorek, Israel. Mediante el desarrollo de las mejores tecnologías de su campo y el trabajo en conjunto con sus aliados, IDE ha logrado un aumento en las capacidades de desalinización de las plantas a gran escala, a la vez que reduce considerablemente los costos de agua desalinizada en contratos BOT (acuerdo por el cual se encomienda el desarrollo de un proyecto) a largo plazo.

Esto se debe a la experiencia adquirida y la excelencia tecnológica que han desarrollado durante casi 50 años, en mega proyectos de osmosis inversa de agua de mar (SWRO).

Las recientes innovaciones en el diseño y construcción de las plantas, y la tecnología de osmosis inversa (RO), introducidas por primera vez en la Planta Sorek, han reducido significativamente el costo global de la desalinización. Estos avances han transformado la industria, como consecuencia ahora más que nunca la desalinización es viable *económicamente y en mayor número de situaciones que antes*.

IDE da una serie de características para el tratado de agua salina, usando la tecnología de membranas desarrollados por ellos mismos, a continuación, se presentan.

3.3.2. Características opcionales para las soluciones de membranas

- ❖ Supervisión de la instalación y puesta en servicio.
- ❖ Suministro de servicios llave en mano.
- ❖ Programa de mantenimiento.
- ❖ Supervisión del contrato de operación y mantenimiento (O&M).
- ❖ Sistema de eliminación de boro.
- ❖ Postratamiento y pulido.

3.3.3. Investigación sobre la tecnología de membranas

La investigación sobre membranas ha aumentado su eficacia y ha reducido los costes tanto de operación como de inversión. Con la osmosis inversa se emplean equipos modulares que presentan la ventaja de no necesitar grandes depósitos para almacenar el agua.

Desde el punto de vista de las leyes de la física, se requiere aproximadamente una presión de 1 psi para eliminar 100 mg/l de sólidos disueltos en el agua por osmosis inversa, por tanto, la presión osmótica de un agua salobre con 5 000 mg/l es del orden de 50 psi. La presión osmótica del agua del mar es de unos 400 psi, de forma que para vencer la presión osmótica y alcanzar una aceptable productividad, habrá de trabajarse a una presión mínima de 600 psi. Las plantas de desalación de agua del mar suelen operar entre 800 y 1000 psi.

A nivel mundial, hay una capacidad instalada de 99.8 millones de metros cúbicos al día (m³/día), y una capacidad en funcionamiento de 92.5 millones de m³/día (datos extraídos del IDA (International Desalination Association) yearbook 2017-18, correspondiente a la cantidad acumulada entre los años 1964 y 2017, se comenta lo siguiente:

- ❖ Se estima que a nivel mundial aproximadamente el 60% del agua desalada es agua de mar y *también un 60% es el porcentaje que representan las tecnologías de membranas respecto a otras como la evaporación (que ya solo se usan en países del Golfo Pérsico y con tendencia a reducirse).*
- ❖ Una curiosidad es que a nivel mundial solo el 3% del agua desalada se usa para la agricultura, mientras que en España ese porcentaje llega hasta el 23% Desalación Camino al Foro Mundial del Agua Brasilia 2018.
- ❖ España es el 5º país en capacidad instalada, por detrás de los países del Golfo Pérsico, con Arabia Saudí a la cabeza, y tras Estados Unidos. Camino al Foro Mundial del Agua Brasilia 2018.
- ❖ Se estima en España una capacidad instalada en el entorno de 3-3.3 millones de m³/día producido por unas 1 000 desaladoras (de nuevo se trata de estimaciones porque es difícil conocer todas y cada una de las plantas de diverso tamaño que hay en industrias, explotaciones agrícolas, etc.

- ❖ En España el 87% de las plantas son con la tecnología de ósmosis inversa (hay otras de electrodiálisis reversible, alguna de evaporación, etc.). El agua desalada representa aproximadamente el 5% del agua de abastecimiento en España.

En la tabla 3.1 (publicada por El Agua en Canarias. Modelos de gestión y tecnología hacia la sostenibilidad), figuran diversos datos generales sobre los procesos de desalación y características generales de operación y producción.

Tabla 3.1 Tabla Comparación de procesos de desalación de agua de mar (APF – ITC S.A.).
Fuente: (Potable, e. A., 2019).

TECNOLOGÍA	ESME (MSF)	ED	CV	O.I.	
				1° PASO	2° PASO
	EVAPORACIÓN	EVAPORACIÓN	EVAPORACIÓN	MEMBRANAS	
ESTADO COMERCIAL	Completamente desarrollado	Desarrollo más reciente	Desarrollo en evolución	Desarrollado	
CAPACIDAD	8 millones m ³ /día	0.73 millones m ³ /día	0.58 millones m ³ /día	5 millones m ³ /día	
PRODUCCIÓN INSTALADA	1 086 plantas	605 plantas	700 plantas	5 140 plantas	
CAPACIDAD MÁXIMA INSTALADA	45 000 m ³ /día	10 000-18 000 m ³ /día	3 000m ³ /día	8 - 9 000 m ³ /día	
PLAZOS INSTALACIÓN	24 meses	18-24 meses	12 meses	18 meses	
FABRICANTES	Numerosos. Amplia competencia	Escasos. Reducida capacidad de elección	Escasos	Numerosos suministradores de plantas y fabricantes de membranas	
CONSUMO ENERGÍA: VAPOR ELÉCTRICIDAD	110-125°C 3-6 kWh/m ³	60-70°C 1.5-2.5 kWh/m ³	- 8-12 kWh/m ³	- 5-6 kWh/m ³	- 6-7 kWh/m ³
RELACIÓN PRODUCCIÓN AGUA/VAPOR	8-12 m ³ /t	6-12 m ³ /t	-	-	-
TEMPERATURA MÁXIMA PROCESO	90-110-120°C	70-75 °C	70-75 °C	-	-
CALIDAD AGUA DESALADA	<40 ppm	<40 ppm	<40 ppm	400 ppm (espiral) 200 ppm (fibra hueca)	<40 ppm
CONVERSION NETA DE AGUA DE MAR (PRODUCTO/AGUA MAR BOMBEADA)	10-25 %	15-30%	40-50%	35-45%	35-45%
FACTOR DE PRODUCCIÓN	Elevado. Condicionado a planta eléctrica.	Elevado. Condicionado a planta eléctrica.	Elevado. Independiente planta eléctrica.	Elevado. Independiente planta eléctrica.	
FLEXIBILIDAD PLANTA	60-100%	30-100%	-	Por módulos	
NECESIDADES DE MANTENIMIENTO	Limpiezas periódicas 2-4 veces/año	Limpiezas periódicas 0.5-2 veces/año	Limpiezas periódicas 0.5-2 veces/año	Limpiezas periódicas 1-2 veces/año	
SENSIBILIDAD A CONDICIONES DEL AGUA DE MAR	Media	Reducida	Reducida	Alta. Control vital vida de membranas	
PRETRATAMIENTO	Moderado	Simple	Simple	Exigente	
INFLUENCIA CONDICIONES OPERACIÓN	Alta incidencia. Corrosión/ incrustación	Baja-Media	Baja	Alta incidencia vida de membranas	

3.4. La desalinización con tecnología de membranas en México

En Latinoamérica, la combinación de procesos de desalinización con energías renovables como la solar, el constante desarrollo tecnológico en el uso de membranas, y la creación constante de programas gubernamentales han hecho de México un país pionero en la utilización de tecnologías de desalinización (Camilo Castro-Jiménez, C. C.-J.-J.-M.,2019).

La misma fuente señala que la única planta nuclear de México utiliza un sistema de OI, ya que este proceso produce el nivel de filtración más fino existente y que la planta de 50 GPM –cuya eficiencia en remoción de sales, materia orgánica, iones y bacterias es del 99 %–, se compone de un sistema de filtración de arena de zeolita, filtros de cartucho de propileno, un sistema de OI compuesto por dos pasos (24 membranas en total) con inyección continua de antiincrustante, un sistema de desgasificación y un módulo de electro-desionización (Camilo Castro-Jiménez, C. C.-J.-J.-M.,2019).

México cuenta con grandes fuentes de energía tanto convencional como renovable, en los últimos 30 años se han instalado plantas de desalinización para el sector turístico, para el municipio y uso industrial en la generación de energía. Al iniciar el siglo XXI había 171 plantas instaladas de las cuales solo 120 se encontraban en operación (García C.R. de J., H. R., 2015).

El proyecto más grande instalado en México estaba en Hermosillo Sonora, la cual fue clausurada en el año 2002, aun así, demuestra que en el país la desalinización es una alternativa para atacar el problema latente (Becerril, f. M.,2014).

CAPÍTULO IV.

MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN CON TECNOLOGÍA DE MEMBRANA Y SISTEMAS TÉRMICOS, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA MARINA.

Aquellos que pretenden descubrirlo todo, pero no encuentran pruebas, pueden Ser considerados como en realidad pretendieron descubrir lo imposible.

Arquímedes de Siracusa

4. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN CON TECNOLOGÍA DE MEMBRANA Y SISTEMAS TÉRMICOS, PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA MARINA

4.1. Métodos de desalación con tecnología de membranas

La desalación comenzó a finales del siglo XIX, aunque desde siempre la desalación ha existido de manera natural, mediante el proceso de evaporación del agua de mar en el ciclo hidrológico.

Entre las técnicas de desalación existentes está la desalación mediante *sistemas por membranas* o la desalación mediante destilación o evaporación conocidos como *sistemas térmicos* (más costosas energéticamente).

La desalinización de agua de mar por medio de membranas es un proceso que separa el agua salina en dos vertientes: una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y una corriente de salmuera concentrada.

En la desalación mediante membranas se encuentran las técnicas:

- ✓ Ósmosis inversa (OI). (técnica más utilizada en España).
- ✓ Nanofiltración (NF).
- ✓ Ultrafiltración (UF).
- ✓ Microfiltración (MF).
- ✓ Electrodialisis (ED).

4.2. Ósmosis Inversa (OI)

Se trata del sistema de *desalinización* más extendido y avanzado en todo el mundo. Su implantación supone más del 60 % respecto al resto de métodos. Este proceso de tratamiento de agua se realiza gracias al aporte de energía exterior en forma de presión, y que vence a la presión osmótica natural presente en dicha solución.

El proceso de *Ósmosis Inversa* consiste en aplicar presión sobre una solución de agua salada y hacerla pasar a través de una membrana semipermeable cuya función es permitir el paso del disolvente (el agua) a través suya, pero no el soluto (las sales disueltas). El disolvente (el agua) pasa a través de la membrana, desde el lado donde la concentración de sales es más elevada hacia el lado donde la concentración de sales es menor. El resultado es que la parte de la solución concentrada se agota en favor de la dulce, que se ve incrementada.

La Ósmosis es un fenómeno físico por el cual, si dos líquidos separados por una membrana semipermeable con diferente concentración entran en contacto, ésta tiende a igualarse, el líquido de menor concentración atraviesa la membrana hacia el de mayor concentración, así como se puede visualizar en la figura 4.1.

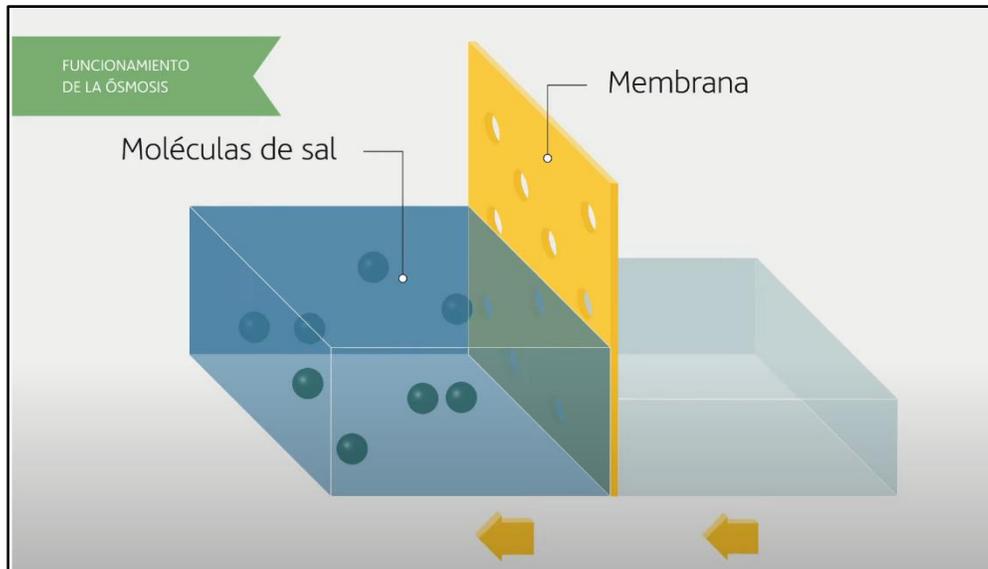


Figura 4.1 Dos líquidos separados por una membrana su concentración, proceso de Ósmosis. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

Por otro lado, en la Ósmosis Inversa invertimos el proceso, tomamos agua de mar, solución con alta concentración, le aplicamos una gran presión y lo hacemos pasar a través de la membrana, como se ilustra en la figura 4.2.

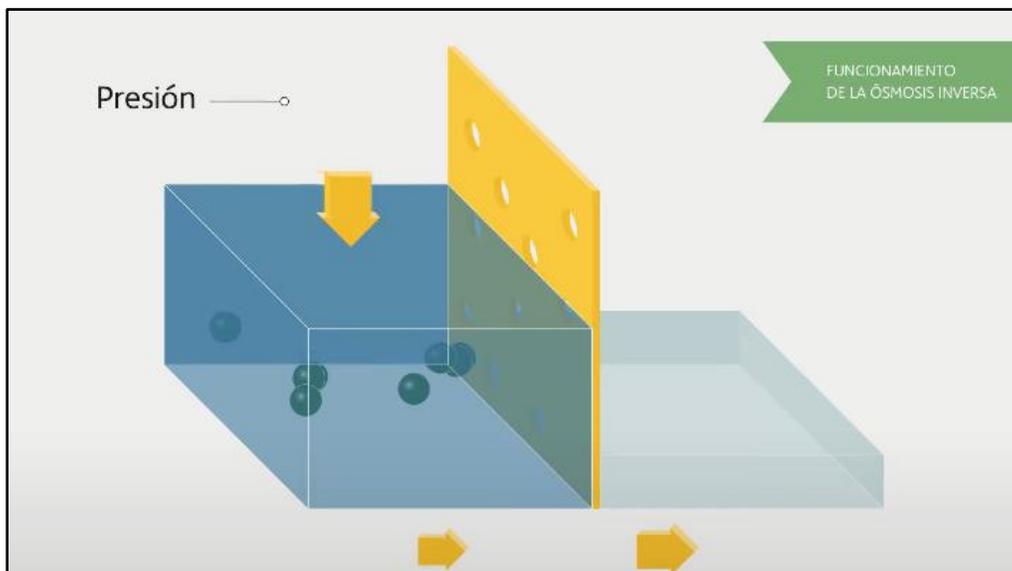


Figura 4.2 Procesos de Ósmosis Inversa, aplicando presión en el agua salada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

al otro lado se obtiene agua sin sal, mientras que en el lado original queda el agua restante con la sal que la membrana ha impedido pasar:

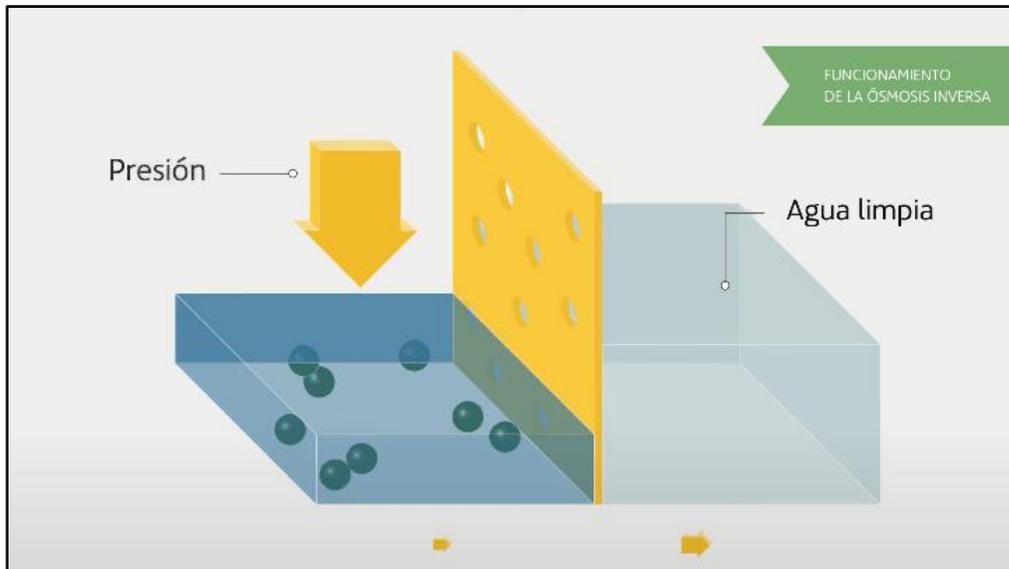


Figura 4.3 Obtención de agua dulce con poca sal. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

El funcionamiento completo es el siguiente:

1. El agua se extrae del mar y recibe un primer tratamiento en el que se eliminan impurezas, aceites, algas, residuos:

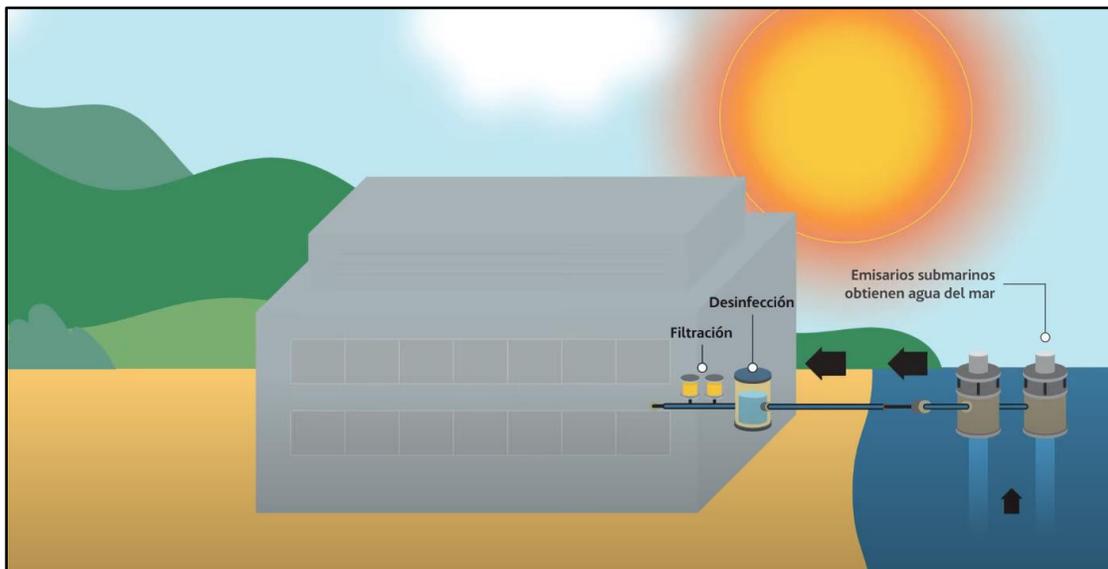


Figura 4.4 Extracción de agua de mar para primer tratamiento. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

2. Una vez libre de sustancias orgánicas, el agua con sal es sometida a la ósmosis inversa. En el filtrado se obtienen dos corrientes, salmuera y agua dulce.

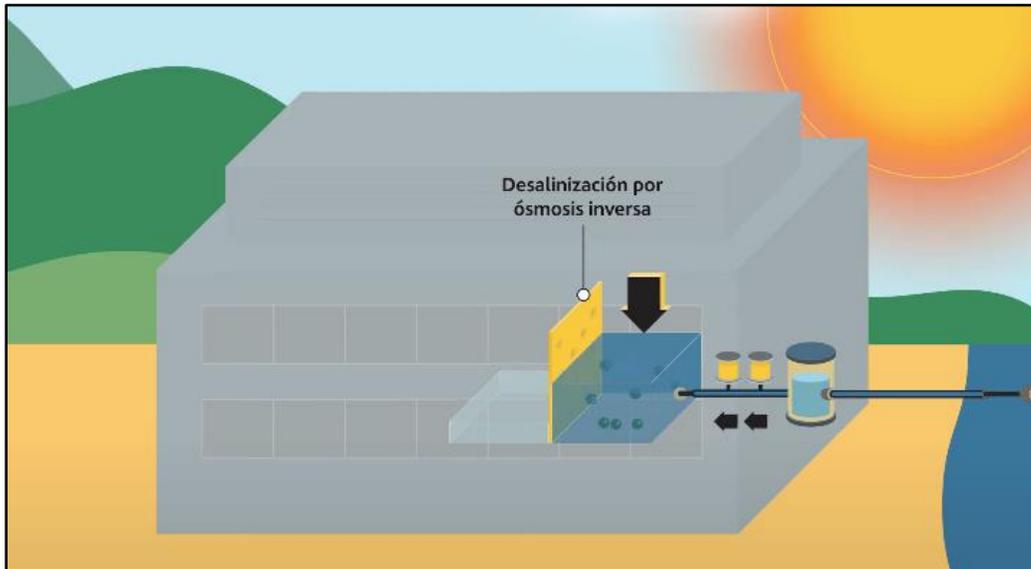


Figura 4.5 Proceso de desalación con Ósmosis Inversa del agua tratada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

3. La salmuera por un lado se diluye antes de ser devuelta al mar para evitar concentraciones de sal, que de otro modo podrían ser nocivas para el ecosistema.

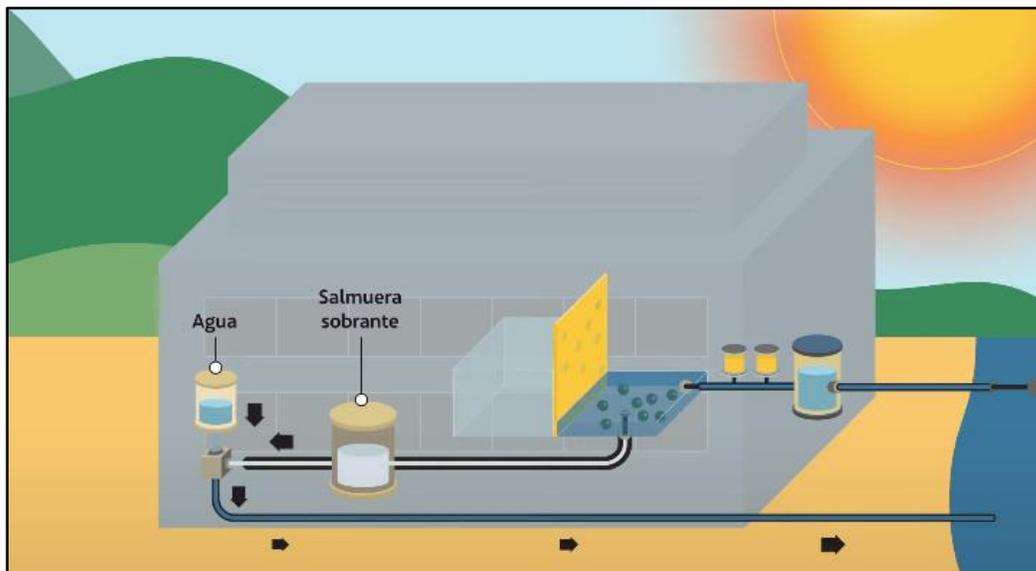


Figura 4.6 Dilución de salmuera, residuo del agua de mar tratada. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

4. El agua dulce por otra parte, pasa por un proceso de remineralización y cloración:

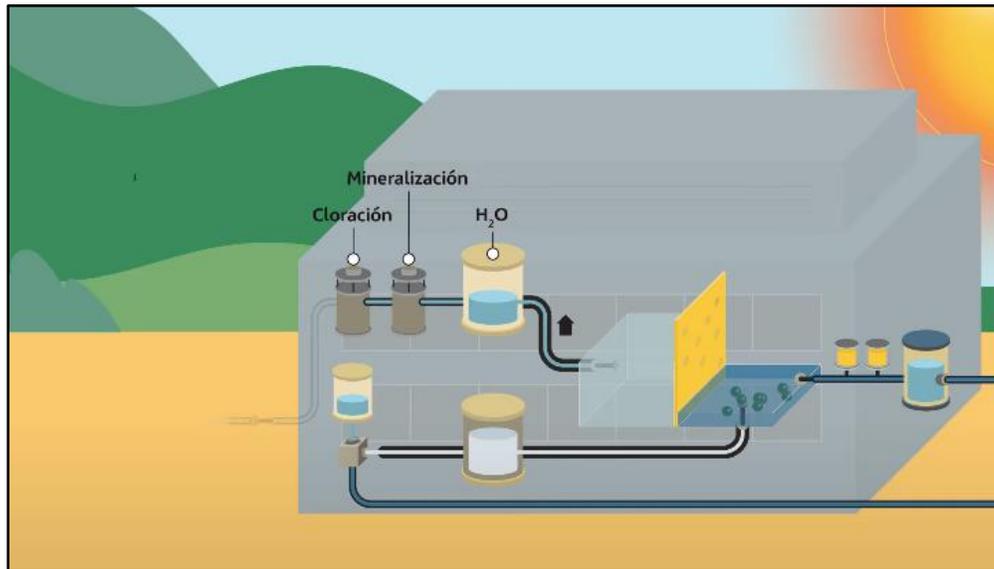


Figura 4.7 Cloración y remineralización del agua dulce obtenida. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

5. Posteriormente se almacena en depósitos y de ahí se envía a la red de distribución para su consumo:

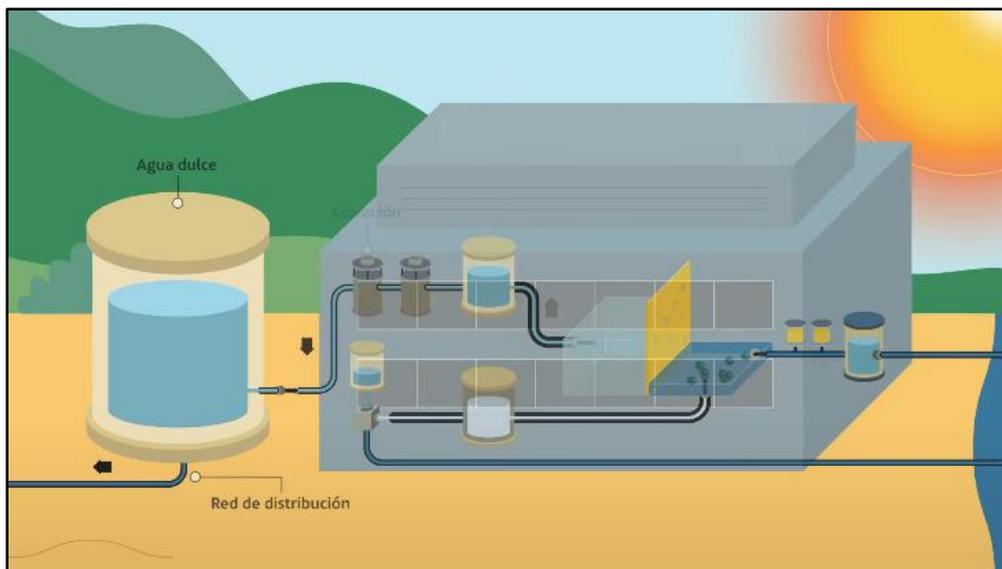


Figura 4.8 Almacenamiento del agua potable, lista para consumo humano. Fuente: (Acciona. 29 de octubre de 2019).

4.2.1. Ventajas

- ✓ La ósmosis inversa es el sistema de desalación más avanzado del mundo.
- ✓ Es el más eficiente y beneficioso para el planeta.
- ✓ Genera hasta 4.5 veces menos emisiones de efecto invernadero nocivas que otras tecnologías de desalación.
- ✓ No produce ningún impacto ambiental en el ecosistema marino.
- ✓ Es capaz de recuperar gran parte de la energía que utiliza en el proceso, con un rendimiento de hasta el 98 %.
- ✓ Los filtros de agua de ósmosis inversa eliminan muchas bacterias y patógenos del agua del grifo. Las bacterias que causan enfermedades como Giardia y Cryptosporidium pueden filtrarse eficazmente, disminuyendo los riesgos de contraer enfermedades gastrointestinales o de otro tipo, asociadas con estos patógenos y bacterias.
- ✓ También elimina el sabor y los olores del cloro; el agua del grifo no solo será más segura, también tendrá mejor sabor.
- ✓ Al igual que con los dispensadores de agua WaterStation, con un filtro de agua de ósmosis inversa ahorrará dinero al prescindir de garrafones de agua.
- ✓ Los sistemas de ósmosis inversa ocupan poco espacio.
- ✓ Debido a que los filtros de agua de ósmosis inversa producen agua altamente purificada, los alimentos cocinados con esta agua tendrán mejor sabor.

4.2.2. Desventajas

- ⊗ Los filtros de agua por ósmosis inversa desmineralizan el agua, lo que significa que también eliminan los minerales saludables que se encuentran naturalmente en el agua. Por ello, deben complementarse con un filtro remineralizador.
- ⊗ Una de las principales razones por las que no se recomienda beber agua purificada mediante ósmosis inversa es porque la eliminación de los minerales hace que el agua se vuelva ácida (a menudo muy por debajo de 7.0 pH). Beber agua ácida no ayuda a mantener un equilibrio saludable de pH en la sangre. El agua debe ser ligeramente alcalina.

- ⊗ Los sistemas de filtros de agua de ósmosis inversa pueden obstruirse, por lo que es necesario instalar un filtro de sedimentos antes del filtro de ósmosis inversa para filtrar las partículas que, de otro modo, podrían obstruir o dañar la membrana de ósmosis inversa.

- ⊗ La filtración por ósmosis inversa es un proceso lento, a diferencia de otros tipos de tecnologías de purificación de agua. Debido a que los filtros de ósmosis inversa necesitan presión para poder purificar el agua, producen una menor cantidad de agua para beber que otro tipo de sistemas de purificación. Algunos sistemas de ósmosis inversa pueden producir sólo 15 galones de agua al día, mientras que los sistemas más avanzados son capaces de producir alrededor de 100 galones de agua purificada al día (como es el caso del purificador de agua para empresas Serie III de WaterStation).

- ⊗ Los equipos de ósmosis inversa tiran agua al drenaje, dado que es parte fundamental del proceso de ósmosis. La relación agua rechazada vs agua utilizable puede variar de 2 a 1 (2 litros de agua que se van al desagüe, por 1 litro de agua para consumir) hasta 12 a 1, dependiendo de las características del agua a tratar y la presión de trabajo.

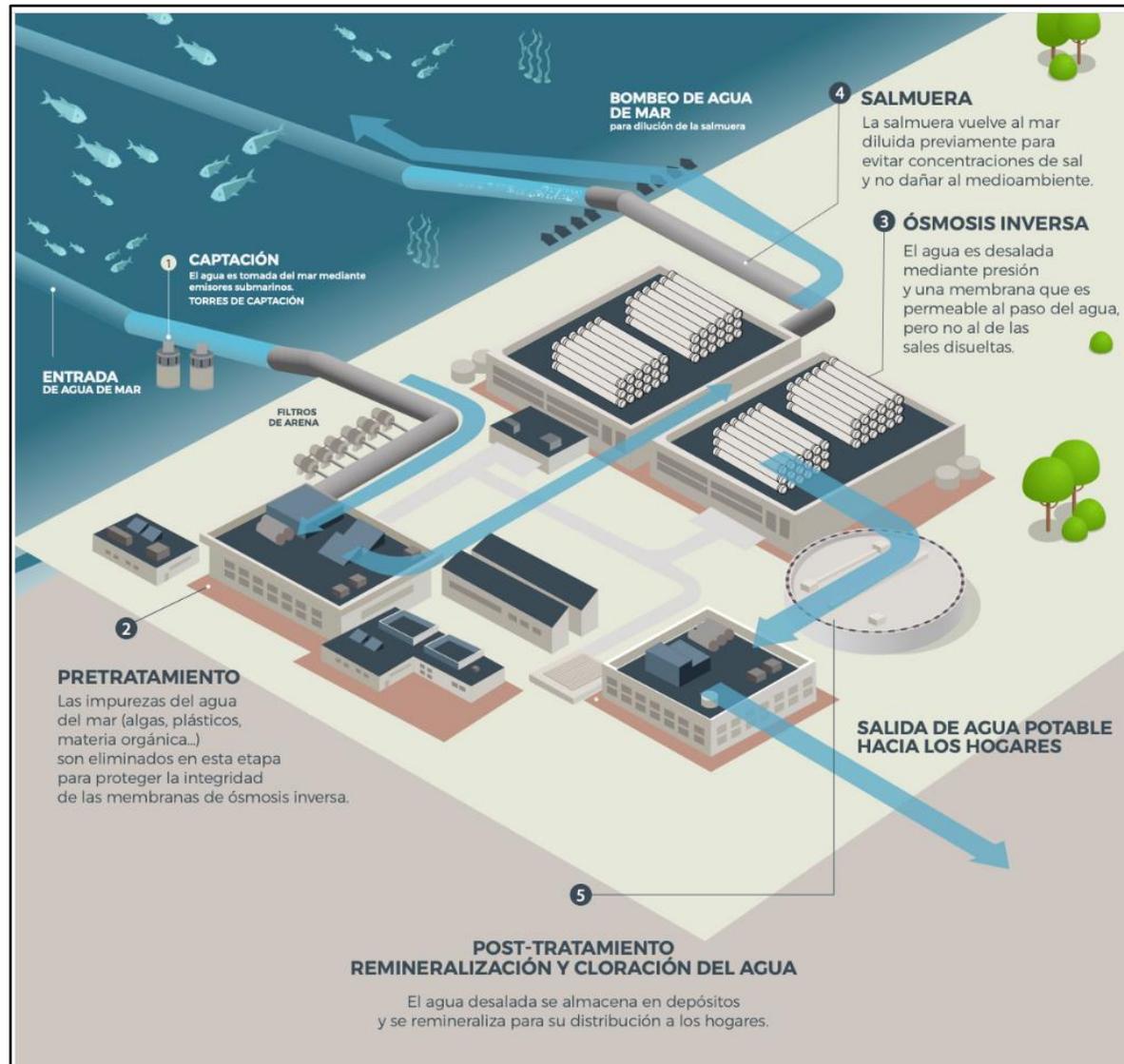


Figura 4.9 Esquema general de una planta desaladora por Ósmosis inversa. Fuente: (A. E. s.f., 2023).

4.3. Nanofiltración (NF)

El principio fundamental de la tecnología de membranas de nanofiltración es el uso de presión para separar los iones solubles del agua a través de una membrana semipermeable. La membrana opera bajo un perfil hidráulico diferente que también se conoce como filtración de flujo cruzado, a diferencia de un filtro sin salida.



Figura 4.10 Esquema general de una planta de Nanofiltración. Fuente: (S.a.s., f. Y. 2023).

La mayoría de las membranas de nanofiltración son materiales compuestos soportados por un sustrato de polímero y fabricados en un diseño en espiral en lugar de una hoja plana o geometría de tubo. Son de estructura microporosa y pueden retener partículas con un tamaño de 0.1 nm-0.001 μm , lo que permite separar del agua la mayoría de moléculas, las de peso molecular más bajo quedan retenidas en la membrana parcialmente. Por lo que este proceso permite la separación de sustancias orgánicas, microorganismos y sales.

Se utiliza para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales, para descontaminación de las aguas residuales, para la eliminación de nitratos, para la eliminación del color y también como pretratamiento antes de la ósmosis inversa.

4.3.1. Ventajas

- ✓ Las membranas de Nanofiltración funcionan a baja presión, usualmente en el rango de 50-250 psi con altas conversiones, considerando como un ahorro significativo de energía.
- ✓ Remueve bacterias, virus y parásitos
- ✓ Tiene menor tendencia al ensuciamiento, en comparación el proceso tecnológico de Ósmosis Inversa.
- ✓ Remueve la dureza como también reduce parcial y simultáneamente el sodio en el agua.
- ✓ Posee tasas de flujo más alta que la Ósmosis Inversa, produciendo hasta 15 galones diarios por pie cuadrado de superficie de membrana.
- ✓ Volúmenes de descarga más bajos, concentraciones de retenido más bajas que RO para sales de bajo valor.
- ✓ Reducción del contenido de sal y contenido de materia disuelta (TDS) en agua salobre.
- ✓ Reducción en metales pesados.
- ✓ Reducción de nitratos y sulfatos.
- ✓ Reducción de color, taninos y turbidez.
- ✓ Suaviza el agua dura cuando se utilizan membranas suavizantes específicas.
- ✓ Libre de químicos, por ejemplo, no necesita sal o productos químicos durante la operación.
- ✓ El pH del agua después de la nanofiltración normalmente no es agresivo.
- ✓ Desinfección.

4.3.2. Desventajas

- ⊗ Tiene un alto rechazo para los Iones Divalentes y Multivalentes.
- ⊗ Remueve parcialmente los sólidos disueltos totales.
- ⊗ Mayor consumo de energía que UF y MF (0.3 a 1 kWh/m³).

- ⊗ El tratamiento previo es necesario para algunas aguas muy contaminadas (prefiltración 0.1 – 20 micras). Este es siempre el caso con las membranas enrolladas en espiral.
- ⊗ Las membranas de nanofiltración son un poco más caras que las membranas de ósmosis inversa.
- ⊗ Las membranas son sensibles al cloro libre (vida útil de 1000 ppmh). Se recomienda un filtro de carbón activo o un tratamiento con bi-sulfito para altas concentraciones de cloro.

4.4. Ultrafiltración (UF)

El principio de la ultrafiltración es la separación física. Es el tamaño de poro de la membrana lo que determina hasta qué punto son eliminados los sólidos disueltos, la turbidez y los microorganismos. Las sustancias de mayor tamaño que los poros de la membrana son retenidas totalmente. Las sustancias que son más pequeñas que los poros de la membrana son retenidas parcialmente, dependiendo de la construcción de una capa de rechazo en la membrana.

Entonces la depuración mediante ultrafiltración es un proceso en el cual el agua no se depura por un proceso químico ni biológico, sino por filtración a través de membranas, obteniendo aguas libres de microorganismos.

A nivel técnico consiste en impulsar el agua residual a presión mediante bombas eléctricas y obligar a esta a atravesar unas membranas con una luz de paso de entre 0.1 y 0.01 micras. De esta manera se crea una separación de partículas realmente diminutas, del orden de los compuestos orgánicos.

Generalmente las membranas que se utilizan son membranas porosas y se clasifican por el peso de corte molecular, que equivale al peso molecular de la molécula más pequeña que pueden retener sus poros al 90%, y que oscila entre 1 000 y 500 000, es decir, moléculas y macromoléculas.



Figura 4.11 Esquema general de una planta de Ultrafiltración. Fuente: (S.a.s., f. Y.,2004).

4.4.1. Ventajas

- ✓ Calidad de agua tratada, reutilización.
- ✓ Estabilidad, calidad del permeado estable con independencia de picos de carga.
- ✓ Desinfección, efluente desinfectado tras atravesar una membrana de ultrafiltración.
- ✓ Compacidad, mínimo requerimiento de espacio.
- ✓ Modularidad, sistemas fácilmente ampliables sin necesidad de reformas ni ampliación de reactor biológico.
- ✓ Mantenimiento, sistemas muy automatizados, mantenimiento mínimo.
- ✓ Eliminación de bulking y espumas de origen filamentoso.

4.4.2. Desventajas

- ⊗ Genera entre un 30 % y 60 % de rechazo, según el agua tratada que debe disponerse o tratarse.
- ⊗ Las membranas de ultrafiltración son más cerradas, que las utilizadas en el proceso de microfiltración.
- ⊗ Poca eficiencia para el tratamiento de aguas con altos contenidos de elementos.
- ⊗ Disminución lenta del flujo de filtración con el tiempo.
- ⊗ Polarización de la concentración.

4.5. Microfiltración (MF)

La microfiltración es el proceso de separación de partículas de tamaño inferior a 10 mm de un fluido, líquido o gas.

El mecanismo habitual por el que se produce la separación de partículas es la retención en superficie, que es la que se produce en la superficie de los filtros de membrana. Generalmente, este tipo de filtros se caracteriza por tener poros con una estructura muy regular, lo cual garantiza niveles de retención muy fiables, de manera que podemos aproximar, en algunos casos, hasta la centésima de micra, sobre todo en materiales como el policarbonato.



Figura 4.12 Esquema general de una planta de Microfiltración. Fuente: (Filtros anoia, s., s.f.).

4.5.1. Ventajas

- ✓ Baja presión de operación requerida.
- ✓ Bajo consumo de energía en unidades semi-inactivas en comparación con la nanofiltración o la ósmosis inversa.
- ✓ Prácticamente no se requieren operaciones manuales.
- ✓ Es relativamente barato.
- ✓ No requiere las transiciones de fase intensivas en energía como la técnica de evaporación.

4.5.2. Desventajas

- ⊗ Sensibilidad a los productos químicos oxidantes (como altas concentraciones de peróxidos y persulfatos nítricos, sulfúricos).
- ⊗ Las partículas duras y afiladas > 0.1 mm pueden causar daños y, por lo tanto, requieren prefiltración de poro más abierto.
- ⊗ El diafragma fallará si se vuelve a enjuagar con una presión superior a 1 bar.

4.6. Electrodiálisis

La tecnología de electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímico, donde los iones son transferidos a través de membranas de intercambio iónico (figura 4.13), por medio de un campo de corriente continua (Belfort, 1984; Mani, 1991).

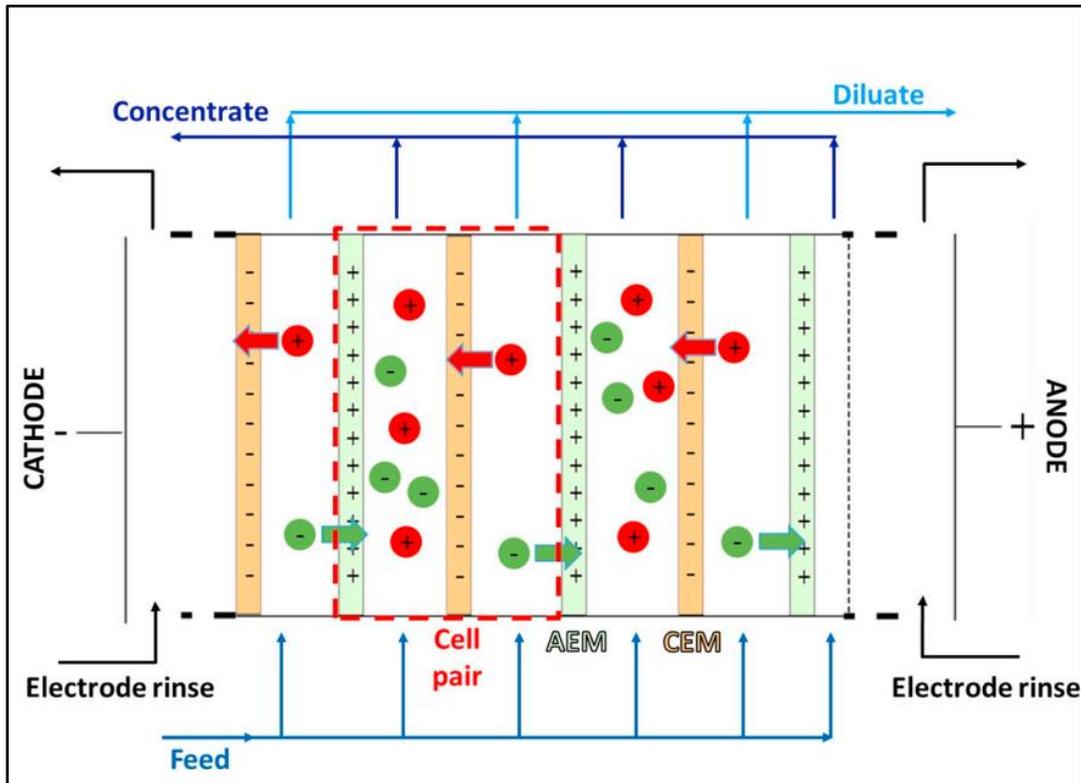


Figura 4.13 Esquema general del proceso de Electrodiálisis. Fuente: (Antonino campione, a. C., 2019).

El proceso de desalinización consiste en el fenómeno mediante el cual se hace pasar una corriente eléctrica a través de una solución iónica. Los iones positivos (cationes) migrarán hacia el electrodo negativo (cátodo), mientras que los iones negativos (aniones) lo harán hacia el electrodo positivo (ánodo). Entre ambos electrodos se colocan dos membranas semi-impermeables que permiten selectivamente solo el paso del Na^+ o del Cl^- , el agua contenida en el centro de la celda electrolítica se *desaliniza* progresivamente, obteniéndose agua dulce.

En este proceso, las sales disueltas ionizadas atraviesan las membranas y de esta forma se eliminan las partículas cargadas eléctricamente. Para efectuar una determinada reducción se dispone de una cascada de células de electrodiálisis.

De otro modo, Torrent (2011) describe que la electrodiálisis, en su modalidad reversible o inversa (EDR), permite obtener elevadas recuperaciones de agua respecto a la ED, gracias a su cambio de polaridad, lo que permite la auto limpieza

de los compartimentos de producto y rechazo, disminuyendo la polarización e incrustación (figura 4.14).

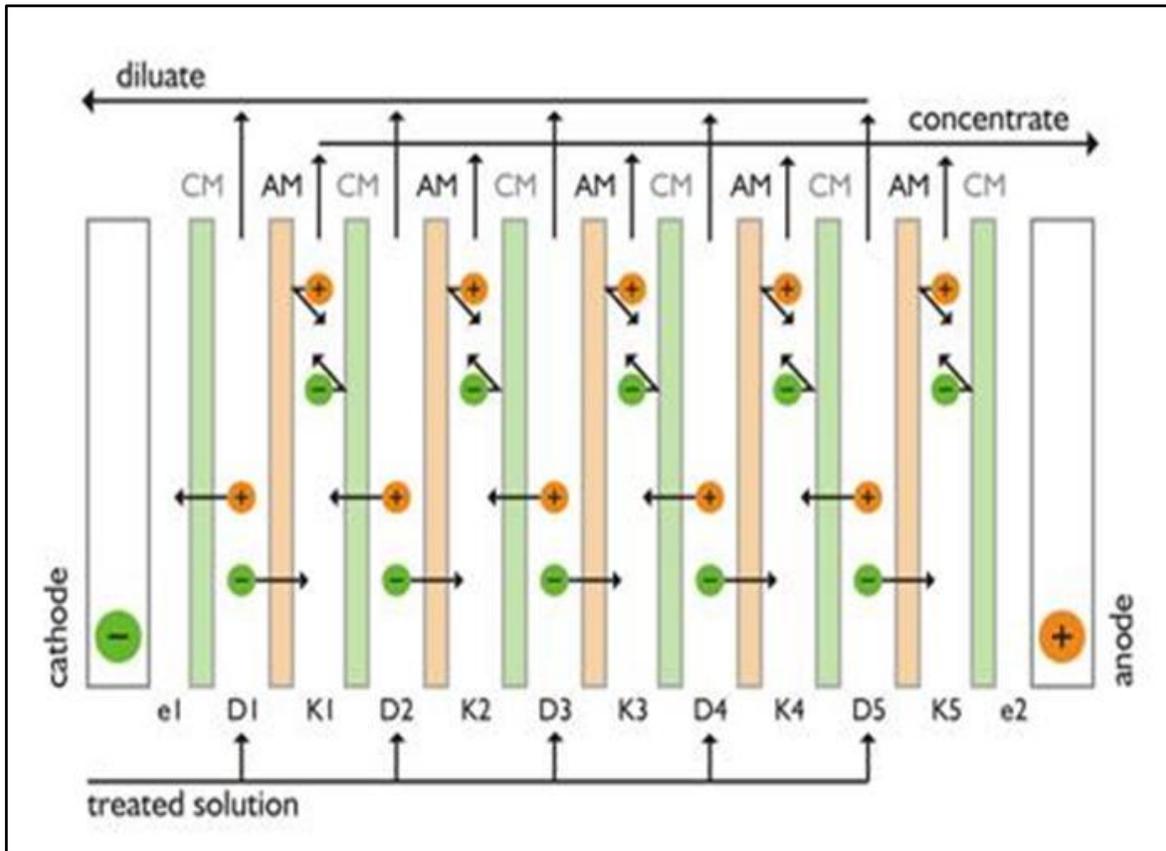


Figura 4.14 Esquema general de una planta de Electrodiálisis Inversa. Fuente: (Arema, 2022).

4.6.1. Ventajas

- ✓ La electrodiálisis es de operación simple y continua.
- ✓ No se requiere de tratamiento químico para regenerar las membranas de intercambio iónico.
- ✓ Hay un bajo costo de operación y mantenimiento, requiriendo poco espacio para su funcionamiento.
- ✓ Este proceso puede competir de forma ventajosa con la destilación para aguas de baja salinidad (salobres).

4.6.2. Desventajas

- ⊗ Las partículas con un diámetro mayor a $1 \mu\text{m}$, pueden obstruir las membranas de intercambio iónico.

- ⊗ Requiere tratamiento de eliminación del dióxido de carbono (CO₂), ya que este al disociarse puede modificar la conductividad del agua.
- ⊗ No remueve microorganismos ni contaminantes orgánicos, así, un postratamiento siempre es necesario si se requiere alta calidad de agua.
- ⊗ Este proceso No puede competir de forma ventajosa con la desalinización para el agua marina.
- ⊗ Las membranas son caras y están sometidas a polarización e incrustación si la intensidad de corriente es elevada. La presencia de materia orgánica, sílice disuelto y hierro en el agua de alimentación incrusta y reduce la vida de las membranas (Arreguín, 2000).
- ⊗ En la electrodiálisis el consumo de energía es proporcional al contenido de sólidos disueltos.
- ⊗ No se tratan por electrodiálisis aguas con más 5 000 de ppm.
- ⊗ No produce una total eliminación de sales, sino que, en la práctica, la reducción de salinidad es del orden del 40%.

4.7. Sistemas de tratamiento térmico

En los sistemas térmicos, los procesos de destilación necesitan calor para provocar el cambio de estado del líquido a vapor, que prácticamente es independiente de la salinidad que tenga el agua. Es el proceso en el cual el agua de mar se calienta hasta evaporarla; después el vapor se condensa formando agua dulce y el agua sobrante se desecha como salmuera concentrada (Porta et al., 2002; Hiriart, 2007).

Entre los principales sistemas de destilación se cuentan la destilación por compresión mecánica de vapor (MVC), destilación relámpago *flash multietapa* (MSF) y destilación multiefecto (MED). Cabe mencionar que estas técnicas son las más utilizadas en Oriente Medio. Las instalaciones de destilación pueden producir agua en un rango de entre 1 y 50 mg de sólidos disueltos (TDS) por litro (WHO, 2007).

4.7.1. Destilación por Compresión Mecánica de Vapor (MVC)

Los sistemas MVC funcionan comprimiendo vapor de agua lo que causa condensación sobre una superficie de transferencia de calor (un tubo) lo que permite al calor de la condensación ser transferido a la salmuera del otro lado de la superficie resultando en la vaporización de esta. El compresor es el requerimiento de energía principal, este aumenta la presión en el lado del vapor y baja la presión del lado del agua salada para bajar su temperatura de ebullición (Cipollina, 2007).

En la figura 4.15 se observa un esquema del funcionamiento de un equipo que desaliniza agua marina por medio de compresión de vapor, donde se utiliza un elemento calefactor en una caldera, y se comprime el vapor para obtener agua con una disminución considerable de sales.

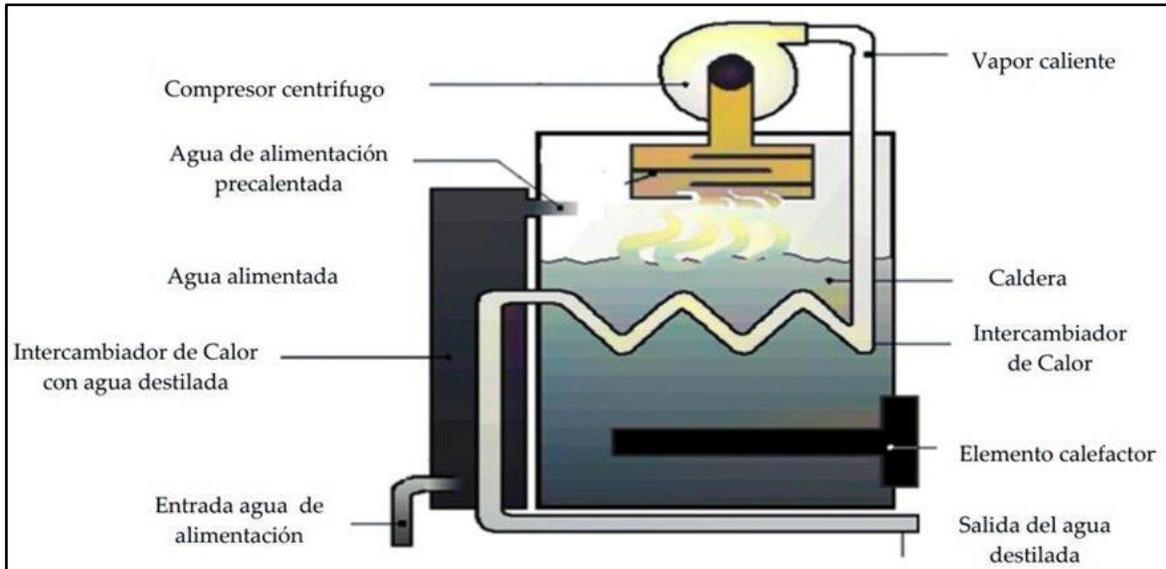


Figura 4.15 Esquema de destilación por compresión mecánica de vapor. Fuente: (Norlandintl 2004).

4.7.2. Destilación flash multietapa (MSF)

Las plantas MSF constituyen una gran parte de la capacidad de desalinización mundial. En este proceso, el agua de mar es calentada en un tanque por medio de un serpentín o tubos en paralelo que contienen algún fluido caliente; después se pasa a otro tanque, llamado etapa, donde la presión reducida permite que el agua hierva.

El agua vaporizada es enfriada y condensada para obtener el producto. Khawaji (2008) menciona que el calor latente liberado en la condensación del vapor es utilizado para calentar la salmuera en otra etapa; el producto destilado se colecta en cascada, en cada uno de los tanques colocados en paralelo con la salmuera y se bombea a un tanque de almacenamiento.

La tasa de producción depende de la temperatura del agua salada y del número de etapas que se lleven a cabo. El agua desalinizada en este proceso contiene por lo general de 2 a 10 ppm de sólidos disueltos, por lo tanto, es remineralizada por potabilización (figura 4.16).

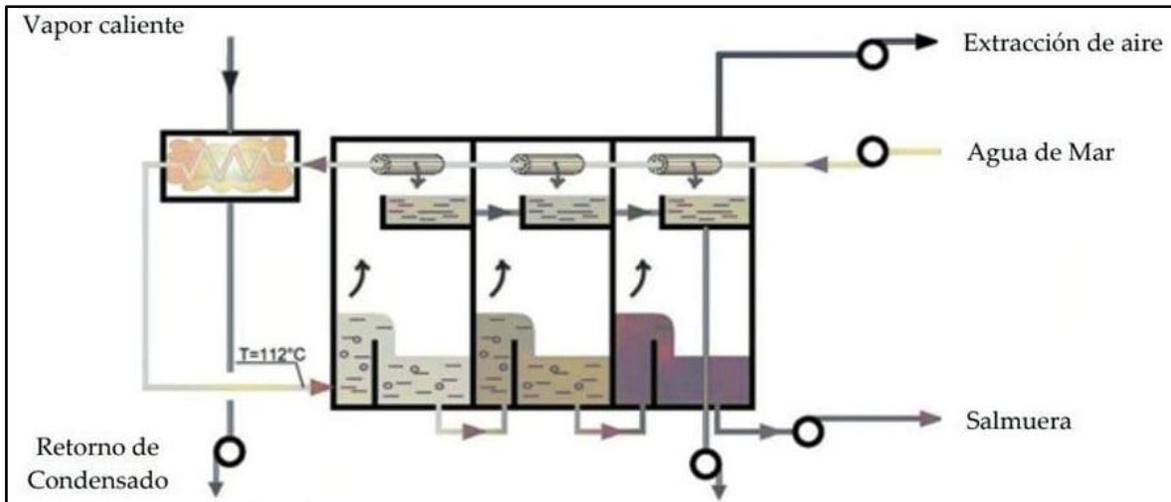


Figura 4.16 Procesos de desalinización mediante MSF. Fuente: (Veolia, 2009).

Las plantas MSF se caracterizan por requerir altos volúmenes y flujo de agua disponible para tratar problemas de corrosión y mineralización en la planta, y altas tasas de uso de químicos en el tratamiento del agua (Valero, 2001).

4.7.3. Destilación multiefecto (MED)

Las plantas MED se configuran con base en tubos verticales u horizontales. El vapor se condensa en un lado de un tubo, lo que ocasiona la evaporación de agua salada en el otro lado. En la configuración más común de este proceso, el agua salina, al evaporarse, es distribuida sobre la superficie exterior de tubos calentados.

Dentro de cada efecto MED se rocía agua marina fresca sobre un grupo de tubos de intercambio térmico mientras el vapor que fluye a través de los tubos se condensa, volviéndose agua pura. Fuera de los tubos, la delgada película de agua marina hierve a medida que absorbe el calor del vapor.

El vapor resultante pasa a través de eliminadores de rocío para atrapar gotas de salmuera remanentes antes de que el vapor se introduzca en los tubos para el próximo efecto. El proceso se repite a través de toda la planta. También están disponibles configuraciones MED alternativas que emplean tubos verticales o superficies de transferencia de calor planas (WHO, 2007).

La presión se reduce de forma secuencial en cada efecto a medida que la temperatura se reduce; se proporciona más calor en cada etapa para mejorar el desempeño del proceso.

Este tipo de instalaciones cubre grandes superficies como se puede apreciar en la (figura 4.17).

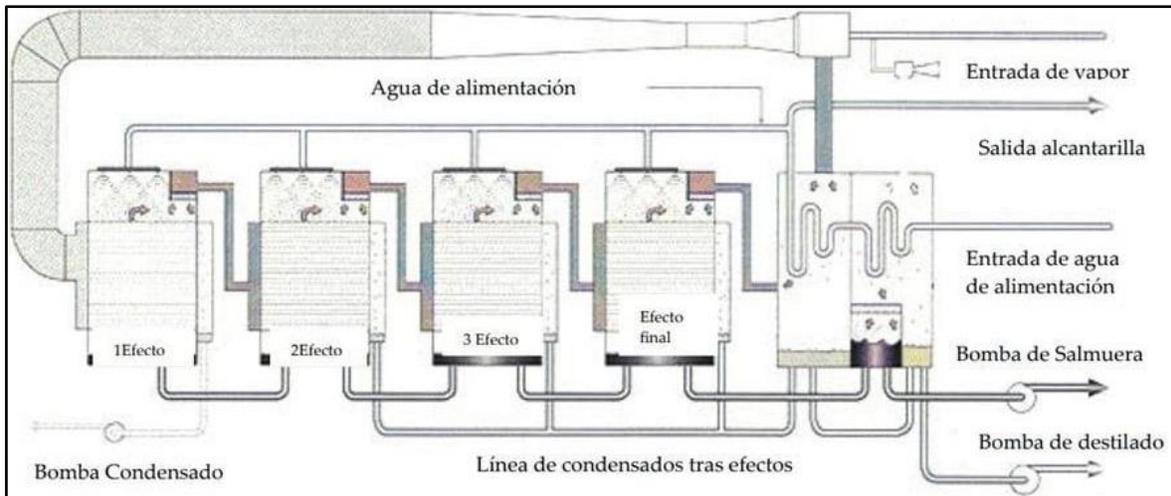


Figura 4.17 Procesos de Destilación Multiefecto (MED). Fuente: (Cetenma, 2008).

4.8. Otras tecnologías que se utilizan

4.8.1. Congelación

Este proceso de *desalación* consiste en pulverizar agua de mar en una cámara refrigerada y a baja presión. Esto hace que se formen unos cristales de hielo sobre la salmuera, que posteriormente se separan para obtener el agua dulce.

4.8.2. Formación de hidratos

Este proceso de desalinización no se utiliza a gran escala debido a que conlleva una gran dificultad tecnológica. El proceso consiste en añadir hidrocarburos a la solución salina que forman unos hidratos complejos en forma cristalina, que posteriormente se separan para obtener agua desalinizada.

CAPÍTULO V.

CÁLCULO TEÓRICO DE DESALACIÓN CON MEMBRANAS

Si Dios ha hecho del mundo un mecanismo perfecto, por lo menos ha concedido tanto a nuestra inteligencia imperfecta que con el fin de predecir pequeñas partes de él, no tenemos que resolver ecuaciones diferenciales innumerables, pero puede usar los datos con bastante éxito.

Max Born

5. CÁLCULO TEÓRICO DE DESALACIÓN CON MEMBRANAS

5.1. Descripción general de las membranas de intercambio iónico

Los elementos membranas de intercambio iónico (IEM, por sus siglas en inglés) representan los componentes clave de todos los procesos de electro-membrana, y la celda que se ocupará, no es la excepción. Las IEM son típicamente laminas delgadas de material poliamida que contienen grupos cargados fijos que son ionizables en agua, sobre la base de la presencia de grupos cargados positiva o negativamente, estas membranas se pueden clasificar en primer lugar en membranas de intercambio aniónico y catiónico, respectivamente.

Como relata Campione, 2018, una membrana de intercambio catiónico (CEM) se caracteriza por la presencia de cargas negativas fijas, por lo tanto, es capaz de dejar que los iones positivos (contra-iones) se mueven a través de ella y bloquean los aniones (co-iones). En cambio, la membrana de intercambio aniónico (AEM) bloquea los cationes permitiendo el transporte de aniones. Este principio de exclusión, teorizado en primer lugar por Donnan que representa la característica fundamental de IEM y hace que la operación de todos los procesos de electro-membrana sean posibles.

5.2. Equilibrio de Donnan y potencial de membrana

Se dice que cuando una IEM está en contacto con una solución electrolítica, las cargas fijas en la superficie de la IEM atraen contraiones por la Ley de Coulomb de fuerzas y generan un campo eléctrico. La exclusión de Donnan, provoca un cambio brusco de concentración en la interfaz IEM-solución, generando así una región cargada muy delgada llamada doble capa eléctrica (nanoescala, longitud de Debye), donde los contraiones neutralizan las cargas fijas en la IEM, y su concentración es mucho mayor que la concentración de co-iones (Figura 5.1).

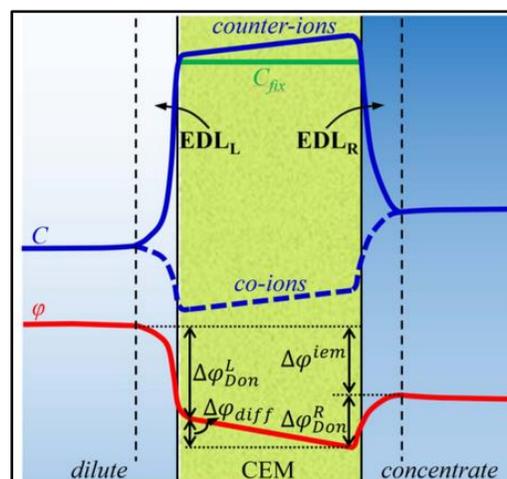


Figura 5.1 Representación esquemática de la concentración de iones y potencial eléctrico para una solución de electrolito monovalente binario en una membrana de intercambio catiónico sumergida entre una solución diluida y otra concentrada. Fuente: (Campione, 2018).

Por ende, el autor comenta que los contraiones tienden a difundirse desde la IEM a la solución electrolítica, mientras que los co-iones se difunden en la dirección opuesta. Sin embargo, los grandes gradientes de potencial químico son contrarrestados por un gran gradiente de potencial eléctrico, el llamado Potencial de Donnan, por lo que se conserva el potencial electroquímico (Equilibrio de Donnan) y el flujo neto de iones es nulo (Campione, 2019).

Se ha estudiado que la equivalencia entre los potenciales electroquímicos de iones en la solución electrolítica y en la IEM en equilibrio con ella, el potencial de Donnan ($\Delta\varphi_{Don}$) se puede expresar como:

$$\Delta\varphi_{Don} = \varphi^{iem} - \varphi^{SOL} = \frac{1}{z_i F} \left[RT \ln \left(\frac{\alpha_i^{SOL}}{\alpha_i^{iem}} \right) + \bar{V}_i \Delta\pi \right] \quad (5.1)$$

Donde:

φ^{iem} es el potencial eléctrico en el lado IEM, φ^{SOL} es el potencial eléctrico en el lado de la solución, F es la constante de Faraday, z es la valencia, R es la constante universal de los gases, T es la temperatura absoluta, α es la actividad del ion, \bar{V} es el volumen molar parcial, $\Delta\pi$ es la diferencia de presión osmótica entre las dos fases, el subíndice i se refiere al ion de sal i , y los superíndices iem y SOL indican la membrana y la solución, respectivamente.

Por otro lado, igualando los potenciales de Donnan para catión y anión, siendo el término de presión osmótica $\bar{V}_i \Delta\pi$ despreciable con respecto al RT-logarítmico, y suponiendo que los coeficientes de actividad son iguales en ambas fases, se puede obtener el equilibrio de Donnan para la concentración como:

$$c_{co}^{iem} = \sqrt{\left(\frac{C_{fix}}{2}\right)^2 + C^{SOL2}} - \frac{C_{fix}}{2} \quad (5.2)$$

Donde:

c_{co}^{iem} es la concentración de co-iones en la membrana, C_{fix} es la concentración fija de carga y C^{SOL} es la concentración de sal en la solución.

Se dice también que una IEM sumergida entre dos soluciones a diferentes concentraciones está sujeto a una diferencia de voltaje en los dos lados, denominada *potencial de membrana*. Según la conocida teoría de Teorell-Meyer-Sievers (TMS), la cual se puede calcular el potencial de membrana de la siguiente manera:

$$\Delta\varphi^{iem} = \Delta\varphi_{Don}^L - \Delta\varphi_{Don}^R + \Delta\varphi_{Diff} \quad (5.3)$$

Donde:

$\Delta\varphi_{Don}^L$ es el potencial de Donnan en el lado izquierdo, $\Delta\varphi_{Don}^R$ es el potencial de Donnan en el lado derecho y $\Delta\varphi_{Diff}$ es el potencial de difusión derivados del gradiente de concentración dentro de la membrana y de la diferente difusividad de los dos iones. (Campione, 2018) describe la expresión más simple del potencial de membrana, como a continuación se presenta y que se puede derivar de la teoría TMS es:

$$\Delta\varphi^{iem} = (2t_{counter}^{iem} - 1) \frac{RT}{z_i F} \ln \frac{a^{SOL,R}}{a^{SOL,L}} \quad (5.4)$$

Donde:

$t_{counter}^{iem}$ es el número de transporte del contraión en la membrana, mientras que $a^{SOL,R}$ y $a^{SOL,L}$ son las actividades en los lados derecho e izquierdo de la solución, respectivamente (Campione, 2018).

Existen varios estudios sobre el modelo TMS unidimensional, que se basa en varias simplificaciones y suposiciones que predice bien el potencial de membrana dentro de un cierto rango de concentración de soluciones, mientras se desvía de los datos experimentales en otras condiciones, por ejemplo, con grandes relaciones de concentración. Modelos que explican el efecto del nanoporo de la membrana, se han desarrollado como el modelo de "potencial uniforme" y el modelo de "carga espacial", Según reporta (Campione, 2020).

También se dice que, las propiedades electroquímicas tienen la influencia más importante en el rendimiento de las IEM, en particular, los dos electroquímicos principales, las propiedades a medir son la permselectividad y la resistencia eléctrica.

La *permselectividad* indica qué tan selectiva es la membrana para el paso de contraiones. Una membrana selectiva de permeabilidad baja permitirá el paso de co-iones entre compartimentos, lo que afecta negativamente a la eficiencia de separación. Según (Campione, 2018), el método más rápido para estimar la permselectividad de la membrana es mediante la medición del potencial de membrana no óhmico. El potencial de membrana real (medido) en el caso de un electrolito individual en solución se puede escribir como:

$$\Delta\varphi_{measured}^{iem} = a_{iem} \frac{RT}{z_i F} \ln \frac{a^{SOL,R}}{a^{SOL,L}} \quad (5.5)$$

Donde:

$a^{SOL,R}$ y $a^{SOL,L}$ son las actividades de sal en las soluciones en los dos lados (derecho e izquierdo) de la membrana y a_{iem} es la permselectividad de la membrana, que puede verse como la relación entre el potencial de membrana y el teórico dado por la ecuación anterior de Nernst. Para $a_{iem} = 1$, es decir, $a_{iem} = 2t_{counter}^{iem} - 1$, que es la ecuación x.

También se explica en (A. Campione, I. G.,2018) que, mediante una definición más rigurosa, la permselectividad se puede expresar como:

$$a_{iem} = \frac{t_{counter}^{iem} - t_{counter}}{1 - t_{counter}} \quad (5.6)$$

Donde:

$t_{counter}^{iem}$ y $t_{counter}$ son los números de transporte de contraiones en la membrana y en la solución, respectivamente.

Por otro lado, se dice que, uno de los aspectos críticos es que la concentración de electrolitos en la solución que afecta la permselectividad, es por ello que son necesarias múltiples mediciones a diferentes concentraciones para obtener los diferentes valores de permselectividad en todo el rango operativo.

La *resistencia eléctrica* de la membrana (ER), es inversamente proporcional a la conductividad eléctrica que genera caídas de potencial óhmico cuando una corriente eléctrica pasa a través de la pila de membranas, lo que afecta drásticamente el consumo de energía del proceso.

Se ha comprobado que el método más simple para estimar ER es a partir de la pendiente de una curva I-V (corriente-potencial) en modo que la Curva Característica, limitada a la región donde se mantiene la relación lineal entre voltaje y corriente, figura 5.2.

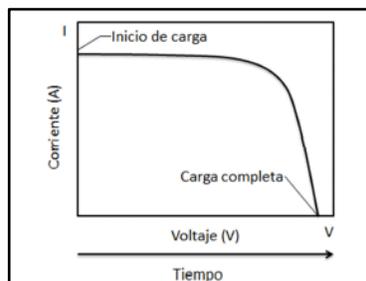


Figura 5.2 Puntos de la curvatura durante la carga.

5.3. Hidrodinámica y transporte de masa en electrodiálisis

Uno de los aspectos de igual manera importante es la hidrodinámica y los fenómenos de masa asociados al transporte es crucial para determinar el rendimiento de las pilas ED y los costos operativos y de capital del proceso.

Ya está demostrado que las limitaciones de transferencia de masa y las caídas de voltaje no óhmicos surgen debido a los llamados *fenómenos de polarización de concentración* y pueden mitigarse mediante movimientos convectivos que mejoran la mezcla. El costo energético del proceso también puede verse afectado por el consumo de energía para bombear las soluciones a través de los canales. Además, las características del canal, que son esenciales para la hidrodinámica y el transporte de masa, también afectan a otros aspectos que pueden ser críticos, como la caída de tensión óhmica, según reporta (Campione, 2018).

La caída de presión en los colectores, las pérdidas de voltaje causadas por una distribución de flujo no uniforme entre y en los canales, las fugas internas debidas a gradientes de presión a través de la membrana son fenómenos adicionales que dependen de la hidrodinámica de la pila.

También podemos destacar que la optimización de ED (o EDR, u otra electromembrana) se basa en un equilibrio muy delicado entre las características de la pila (incluidas las propiedades de las membranas) y las condiciones de funcionamiento.

5.4. Fenómenos de polarización de la concentración

Para los procesos de separación por membrana, en Campione, 2020 explica que la polarización por concentración es un fenómeno que se manifiesta como una concentración de gradiente dentro de la solución y perpendicular a la superficie de la membrana. En el caso de procesos basados en IEM, la corriente eléctrica es transportada aproximadamente en la misma cantidad por cationes y aniones que migran a través de la solución en direcciones opuestas. Por el contrario, dentro de la corriente de membrana es transportada principalmente por contra-iones, mientras que los co-iones son (idealmente) excluidos. Como consecuencia, en la interfase solución-membrana el flujo migratorio de co-iones (típicamente dirigido desde la interfase a la mayor parte de la solución) tiene que ser contrarrestado por un flujo difusivo en la dirección opuesta, intrínsecamente acompañada por una concentración gradiente capaz de generar dicho flujo difusivo según la ley de Fick.

Por otro lado, los fenómenos de transporte y polarización de concentración cerca de las interfaces se han analizado comúnmente mediante el modelo de película de Nernst. La base de esta teoría es la existencia de una *capa de difusión de Nernst* entre la interfase membrana-solución y el fluido a granel con composición uniforme. Esto también se conoce como *capa límite de difusión* (DBL en inglés) y puede considerarse como una fina capa estancada, capa donde no ocurre convección y la

transferencia de masa es controlada por difusión-migración, lo que da como resultado un perfil de concentración lineal como se muestra en la figura (Figura 5.3).

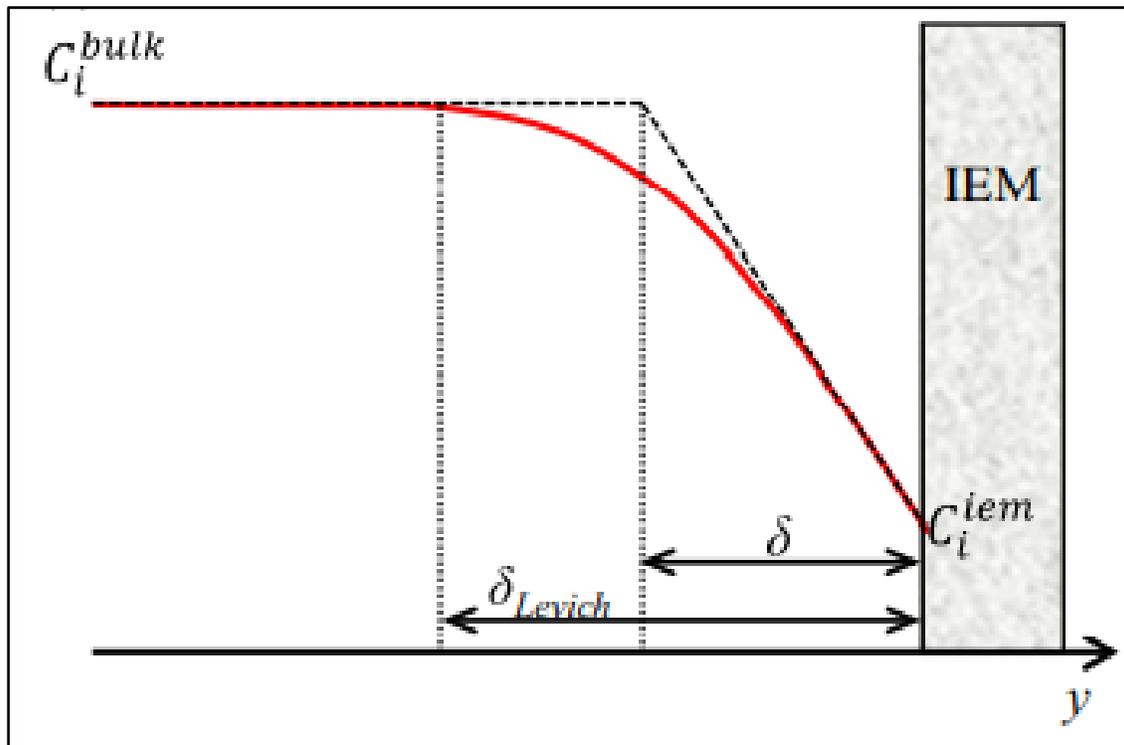


Figura 5.3 Perfil de concentración dentro de la capa de difusión inducida por corriente en condiciones de estado estable: perfil de concentración lineal de Nernst (línea discontinua); Perfil de Levich teniendo en cuenta la contribución de la convección. (línea continua), donde la concentración difiere de la concentración a granel solo en un 1 % a la distancia δ_{Levich} de la IEM. Fuente: (Campione, 2018).

En la fuente Campione, 2018, señala que la idealización de Nernst fue mejorada por Levich, mostrando que la presencia de transporte convectivo dentro del DBL da como resultado un perfil de concentración uniforme y monótono que se acerca asintóticamente a la concentración a granel.

En la misma fuente marca que el transporte de masa en la IEM y soluciones de electrolitos ha sido ampliamente estudiado por la descripción teórica dada por el Nernst-Planck formalismo, que también puede conducir a una definición más rigurosa del gradiente de polarización de concentración. De hecho, bajo ciertas hipótesis el flujo \vec{J}_i de iones tipo i se puede expresar como:

$$\vec{J}_i = -D_i \vec{\nabla} C_i - Z_i F D_i C_i \vec{\nabla} \varphi - C_i \vec{u} \quad (5.7)$$

Donde:

D_i es el coeficiente de difusión iónica, C_i es la concentración, Z_i es la valencia, F es la constante de Faraday, φ es el potencial eléctrico y \vec{u} es el vector de velocidad. Por lo tanto, el flujo total viene dado por la suma del flujo difusivo, migratorio y convectivo.

En el caso del flujo de migración-difusión de iones también se puede calcular con la siguiente fórmula, un flujo de conducción óhmica de difusión química, de modo que, para un electrolito binario fuerte, es:

$$\vec{J}_i = -D\vec{\nabla}C_i + \frac{t_i\vec{i}}{z_iF} \quad (5.8)$$

Donde:

D es el coeficiente de difusión del electrolito, t_i es la migración de transporte e \vec{i} es la densidad de corriente. En la interfase membrana-solución, el balance de masa en condiciones de estado estacionario se obtiene igualando el flujo en el lado de la solución (ecuación 5.8) con el lado de la membrana.

Considerando sólo la componente normal a la superficie de la membrana (coordenada y) se tiene:

$$-D \frac{\partial C_i}{\partial y} + \frac{t_i i}{z_i F} = \frac{T_i^{iem} i}{z_i F} \quad (5.9)$$

Donde:

T_i^{iem} es el número de transporte integral dentro de la membrana, teniendo en cuenta tanto la difusión iónica como la migración (i es positivo si se dirige hacia el eje y positivo). Por lo tanto, la siguiente condición de contorno se puede escribir:

$$\frac{\partial C_i}{\partial y} = -\frac{i}{z_i F D} (T_i^{iem} - t_i) \quad (5.10)$$

En fuentes consultadas, esta condición de contorno a menudo viene dada por una expresión rigurosa donde T_i^{iem} es reemplazado por el transporte de migración dentro de la membrana T_i^{iem} , pero la aproximación está legitimada por el hecho de que la difusión dentro de la IEM es a menudo insignificante (Campione, 2018).

5.5. Ecuaciones de transporte de masa y condiciones de corriente límite/sobrelímite.

5.5.1. Formulación de ecuaciones de transporte de masa en ED y procesos relacionados.

Independientemente del perfil de concentración real, la condición interfacial expresada en la ecuación (5.10), también se puede escribir en forma Nernstiana, tomando en cuenta el espesor DBL (δ) o el Número de Sherwood (Sh):

$$\frac{\partial C_i}{\partial y} = \pm \frac{C_i^{iem} - C_i^{bulk}}{\delta} = \pm \frac{Sh(C_i^{iem} - C_i^{bulk})}{d_{eq}} = - \frac{i}{z_i F D} (T_i^{iem} - t_i) \quad (5.11)$$

Donde:

C_i^{iem} es la concentración en la interfaz IEM-solución (solución de un lado), C_i^{bulk} es la concentración aparente, d_{eq} es el diámetro equivalente. En ecuación (5.11) el signo + debe tenerse en cuenta al pasar de granel a interfaz, mientras que el signo – en el caso contrario, para simplificar, la diferencia de los números de transporte a menudo se supone igual a 0.5 (Campione, 2018).

En la Ecuación (5.11) se identifica las expresiones más comunes de masa tasa de transferencia en estos sistemas, permitiendo además una comprensión profunda de los fenómenos de transporte de masas en las fronteras. De hecho, bajo constantes condiciones de estado, tanto de difusión como de convección en la solución de volumen a interfaz o viceversa compensan la diferencia entre los flujos migratorios a través de la solución y la membrana.

En Campione, 2018 y Campione, 2019, exponen que el número de Sherwood se utiliza para obtener la resistencia interna de transferencia de materia en procesos de separación que utilizan membranas y se define como:

$$Sh = \frac{k d_{eq}}{D} \quad (5.12)$$

Donde:

k es el coeficiente de transferencia de masa. A partir del análisis dimensional, se puede encontrar que el número de Sherwood que depende de la configuración del canal (geometría del espaciador o perfiles de membrana, pero también de la superficie de las paredes, dependiendo de la presencia de espaciadores conductores o perfiles), el número de Reynolds (Re) y el Número de Schmidt (Sc).

5.5.2. Limitación de la densidad de corriente en unidades ED

Para el aumento de densidad de corriente en una pila, siempre va acompañado de un aumento en el transporte difusivo de iones en solución y conduce a un agotamiento de sal en la solución en la interfaz de IEMs del canal diluido. Este

hallazgo permite sólo hasta que la concentración en la pared en la capa agotada se convierte en cero. En esta condición, la llamada *limitación densidad de corriente*, que, de la forma Nernstiana, se puede expresar como:

$$i_{lim} = \pm \frac{C_i^{bulk} z_i F D}{\delta (T_i^{iem} - t_i)} = \pm \frac{Sh C_i^{bulk} z_i F D}{D_{eq} (T_i^{iem} - t_i)} \quad (5.13)$$

En relación con las convenciones de signos en la ecuación anterior, i_{lim} será positivo en dirección del eje y positivo. Por lo tanto, la densidad de corriente límite depende de las condiciones hidrodinámicas, el espesor del canal y el número de transporte de sal. Curiosamente, una vez que los valores de i_{lim} y T_i^{iem} son conocido, el espesor de DBL y Sh podrían calcularse fácilmente a partir de la (5.13), pero cabe señalar que los fenómenos que ocurren en la limitación las condiciones actuales, como la electroconvección, pueden afectar significativamente el valor de Sh determinado con esta ecuación (Campione, 2018).

De las ecuaciones (5.11) y (5.13), se sigue que, para una densidad de corriente $i < i_{lim}$, las concentraciones en la interfase de IEM-solución se pueden expresar como:

$$C_i^{iem} = C_i^{bulk} \left(1 \pm \frac{i}{i_{lim}} \right) \quad (5.14)$$

Los valores de densidad o intensidad de corriente límite, se pueden obtener experimentalmente por curvas de corriente-voltaje (Figura 5.4). A medida que aumenta el voltaje, la corriente aumenta cada vez más lentamente debido a los efectos de la capa límite superior, que aumentan la resistencia, hasta que la corriente aumenta ligeramente con grandes incrementos de voltaje, lo que indica el logro de la condición actual limitante. Sin embargo, cuando el corriente límite es abordado, las observaciones experimentales niegan la presencia de la meseta postulada teóricamente como una curva de saturación, así como se muestra en la siguiente figura:

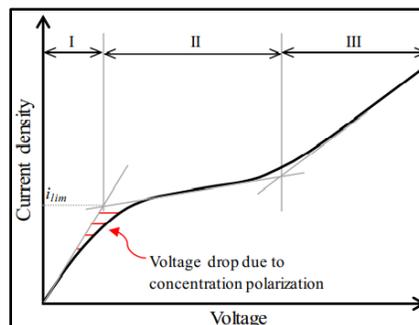


Figura 5.4 Bosquejo de una curva corriente-voltaje típica para IEM sumergido en una solución electrolítica, que muestra una densidad de corriente límite y la presencia de tres regiones distintas. Fuente: (Campione, 2018).

En la figura 5.4, muestra una curva corriente-voltaje típica en forma de S, exhibiendo tres regiones. Región I ha sido a menudo definido como óhmico, aunque esto puede ser engañoso debido a la coexistencia de fenómenos óhmicos y no óhmicos.

En la descripción de Campione, 2018, la primera parte del tramo pequeño, la curva se puede aproximar bien mediante una línea recta; sin embargo, como la corriente aumenta, los efectos de polarización (no óhmicos) se vuelven más pronunciados y provocan una desviación de la tendencia lineal. Una pendiente mucho más baja caracteriza la región II, que puede considerarse como un paso de transición siguiendo el logro de la corriente limitante, convencionalmente identificado por la intersección entre la línea tangente en el primer tracto de la curva corriente-voltaje y la tangente de la meseta (o en el punto de inflexión) en la región II. Luego, la pendiente aumenta de nuevo hacia región III hasta alcanzar un valor asintótico que conduce a una estabilidad lineal aumento de corriente vs voltaje.

5.5.3. Influencia de los fenómenos de polarización en la caída de tensión

En este subtema se dice que, la intensidad de corriente límite es sólo uno de los aspectos relacionados con fenómenos de polarización de la concentración. Sin embargo, varios otros efectos causados por la polarización de la concentración que tienen que ser caracterizadas, ya que puede afectar significativamente la caída de voltaje total de la pila, como se mencionó anteriormente.

Por otro lado, caída de potencial total entre dos soluciones de baño (izquierda, L, y derecha, R) frente a una IEM interpuestos se pueden analizar siguiendo el modelo de segmentación enfoque por TMS, en un sistema multicapa teniendo en cuenta la presencia de los DBL, como se muestra en la siguiente figura:

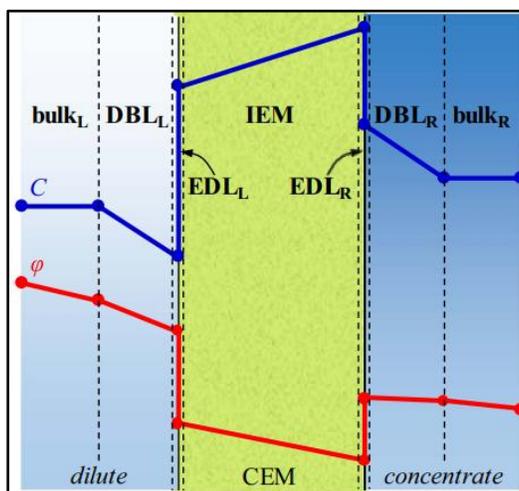


Figura 5.5 Segmentación del sistema compuesto por una membrana y dos soluciones de baño, según la teoría TMS, mostrando concentración de iones y cambios de potencial eléctrico en cada capa. El ejemplo de la imagen muestra una CEM inmerso entre una solución diluida y una solución concentrada. Fuente: (Campione, 2018).

Algunos aspectos relacionados con la caída de tensión total fueron tratados en los primeros estudios teóricos y experimentales de Cooke, Sonin y Probst (Campione, 2018). Sin embargo, la caída de voltaje incluyendo todas las posibles contribuciones se puede expresar como:

$$\Delta V = \eta_{Ohm}^{bulk_L} + \eta_{Ohm}^{DBL_L} + \eta_{diff}^{DBL_L} + \Delta\varphi^{iem} + \eta_{Ohm}^{iem} + \eta_{diff}^{DBL_R} + \eta_{Ohm}^{DBL_R} + \eta_{Ohm}^{bulk_R} \quad (5.15)$$

Donde los diferentes términos representan:

Caída de voltaje óhmico dentro de la izquierda de la solución a granel, caída de voltaje óhmico dentro del DBL izquierdo, (no óhmico) potencial de difusión dentro del DBL izquierdo, potencial de membrana (no óhmico), caída de voltaje óhmico dentro de la membrana, potencial de difusión (no óhmico) dentro del DBL derecho, caída de voltaje óhmico dentro del DBL derecho DBL, caída de voltaje óhmico dentro de la solución a granel correcta.

Para el caso de un electrolito monovalente binario, la bibliografía el potencial de membrana actuando como una fuerza contraelectromotriz se puede expresar como:

$$\Delta\varphi^{iem} = \varphi_{iem} \frac{RT}{F} \ln \left(\frac{C_C^{iem} \gamma_C^{iem}}{C_D^{iem} \gamma_D^{iem}} \right) \quad (5.16)$$

Donde:

C_{SOL}^{iem} y γ_{SOL}^{iem} representan la concentración de electrolitos y el coeficiente de actividad del electrolito en la interfaz IEM-solución (solución a lado) y los subíndices C y D se refieren al concentrado y al diluido canal, respectivamente. Es útil recurrir a los coeficientes de polarización, cuyos valores van de 0 (máxima polarización) a 1 (sin polarización), definida como:

$$\theta_D^{iem} = \frac{C_D^{iem}}{C_D^{bulk}} \quad (5.17)$$

$$\theta_C^{iem} = \frac{C_C^{bulk}}{C_C^{iem}} \quad (5.18)$$

Donde:

C_{SOL}^{bulk} es la concentración de electrolito en la solución (diluida o concentrada) a granel. En un par de celdas, hay cuatro coeficientes de polarización, uno para cada interfaz de solución IEM. Los valores de θ_{SOL}^{iem} se pueden derivar de la ecuación (5.14) en la interfase de IEM-solución, aunque un enfoque más riguroso los relaciona con la (5.11).

Para el potencial de membrana Campione, 2018 y Campione, 2019, describen que se puede dividir en dos términos, uno contable para el potencial de una membrana

idealmente en contacto con las soluciones a granel ($\Delta\tilde{\varphi}^{iem}$), y el otro para la concentración sobre el potencial debido a la polarización en los DBLs (η_{COP}^{iem}) de la siguiente manera:

$$\Delta\varphi^{iem} = \Delta\tilde{\varphi}^{iem} + \eta_{COP}^{iem} = \alpha_{iem} \frac{RT}{F} \left[\ln \left(\frac{C_C^{iem} \gamma_C^{iem}}{C_D^{iem} \gamma_D^{iem}} \right) - \ln(\theta_C^{iem} \theta_D^{iem} \xi_C^{iem} \xi_D^{iem}) \right] \quad (5.19)$$

Donde:

$\xi_D^{iem} = \frac{\gamma_D^{iem}}{\gamma_D^{bulk}}$ y $\xi_C^{iem} = \frac{\gamma_C^{iem}}{\gamma_C^{bulk}}$ (a menudo se supone que es igual a 1). Curiosamente, centrándose en las características relacionadas con la hidrodinámica, los DBLs contribuyen a la caída de potencial total por medio de fenómenos óhmicos y no óhmicos, que se pueden calcular fácilmente asumiendo un comportamiento lineal perfil de concentración. η_{Ohm}^{DBL} se puede calcular mediante la integración de la ley de Ohm la resistividad sobre δ y multiplicando por la densidad de corriente (enfoque unidimensional, donde $i = \text{costo}$). η_{diff}^{DBL} , también llamado concentración potencial o potencial de unión, es estrictamente no óhmico y se origina de la diferencia en los coeficientes de difusión iónica y la necesidad de mantener la electroneutralidad local. Debemos tener en cuenta que η_{Ohm}^{DBL} tiene una naturaleza disipativa, es decir, es causada por el proceso irreversible que involucra efecto Joule; por el contrario, los fenómenos no óhmicos son (al menos idealmente) reversibles y, en última instancia, convierten la energía eléctrica en energía de un gradiente de salinidad. La misma fuente indica que, bajo la hipótesis de una variación lineal de concentración dentro de la DBL y de una conductividad equivalente λ independiente de la concentración η_{diff}^{DBL} y η_{Ohm}^{DBL} se puede expresar como:

$$\eta_{diff}^{DBL} = \pm(t_- - t_+) \frac{RT}{F} \ln(\theta_{SOL}^{iem}) \quad (5.20)$$

$$\eta_{Ohm}^{DBL} = -\frac{FD}{(t_i^{iem} - t_i)\lambda} \ln(\theta_{SOL}^{iem}) \quad (5.21)$$

Donde:

t_- y t_+ son los números de transporte de aniones y cationes, respectivamente. En la ecuación para η_{diff}^{DBL} , el signo $-$ es válido cuando el gradiente de concentración es negativo, como en la figura de segmentación (así, η_{diff}^{DBL} es positivo, es decir, hay una caída de potencial), mientras que el signo $+$ es válido cuando el gradiente de concentración es positivo (por lo tanto η_{diff}^{DBL} es negativo, es decir, hay un aumento potencial) (Campione, 2019).

5.5.4. Correlaciones para coeficientes de transferencia de masa

Para las correlaciones, algo interesante que menciona Campione, 2019, es la caracterización de los fenómenos de transferencia de masa en espacios llenos de espaciadores canales se ha realizado a menudo por medio de correlaciones que unen los Número de Sherwood a los principales parámetros geométricos y operativos.

El uso de números adimensional ofrece las ventajas de una fácil escalabilidad de resultados y fácil implementación/procesamiento de resultados (entrada/salida) en herramientas de modelado (Campione, 2018). Pero también se han reportado correlaciones para i_{lim} en la mayoría de los casos, los datos se ajustan mediante leyes de potencia, como:

$$Sh = aRe^bSc^c \quad (5.22)$$

$$i_{lim} = dC_i^{bulk^e} u^b \quad (5.23)$$

Se enfatiza que se debe tener en cuenta que el exponente de Re corresponde al exponente de u en la ecuación (5.23). También se describe que se encontró que b estaba cerca de 0.5, mientras que en otros casos b varió de 0.13 a 1; sin embargo, mucho más también se han informado tendencias complejas en un rango más amplio de valores de Re y se han propuesto correlaciones modificadas (Campione, 2018). Para esto último, vale la pena destacar que las leyes de potencia y los valores de los coeficientes relevantes pueden ser adecuado solo en un rango estrecho de números de Reynolds, mientras que las pilas ED pueden operar en un rango de Re relativamente grande que involucra diferentes regímenes de flujo (Campione, 2018).

Se comenta que debido al alto número de Schmidt (aproximadamente 600 para soluciones de NaCl a una concentración por debajo de 0.5 M), el campo de concentración se desarrolla en una región de entrada más larga, en la que el número de Sherwood local el número disminuye hacia su valor completamente desarrollado y para el caso de los efectos de entrada en la transferencia de calor y masa se conoce como el *problema de Graetz-Lévêque*, según Campione, 2018. En el caso de canales planos relativamente cortos (longitud $L < 0.02uh^2/D$, siendo h el espesor del canal), la correlación del número de Sherwood promedio en condiciones laminares es:

$$Sh = 1.47 \left(ReSc \frac{h}{L} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.24)$$

5.5.5. Correlaciones para la caída de presión y la influencia de la potencia de bombeo en consumos de energía

Para el caso de los datos sobre las caídas de presión en los sistemas de urgencias, se pueden encontrar en varias referencias como por ejemplo Fabao, 2017. Es importante recalcar que el consumo de energía para las soluciones de alimentación,

el bombeo depende en gran medida de las caídas de presión, que se puede caracterizar simplemente por la correlación entre el factor de fricción (f) y el número de Reynolds, a menudo se encuentra como una ley de potencia:

$$f = ARe^{-B} \quad (5.25)$$

Se puede decir que el exponente B tiende a 1 a muy baja Re , como se muestra en la figura 5.6a):

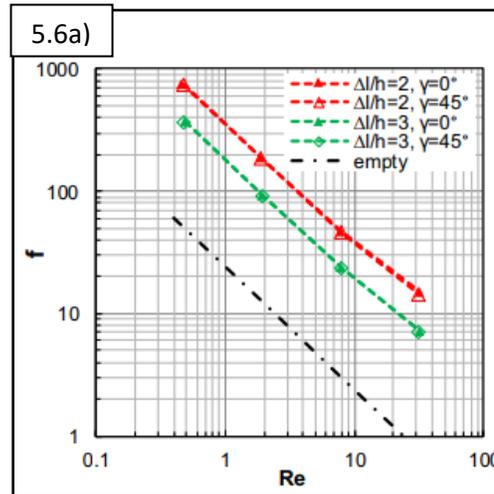


Figura 5.6a) Números de Reynolds inferiores: resultados de simulaciones CFD de flujo completamente desarrollado dentro de espaciadores tejidos con diferentes relaciones de altura de paso ($\Delta l/h$) y ángulos de ataque de flujo (γ). Fuente: (Campione, 2018).

Pero también, se puede notar que disminuye a medida que aumenta Re , como se ve en la figura 5.6b):

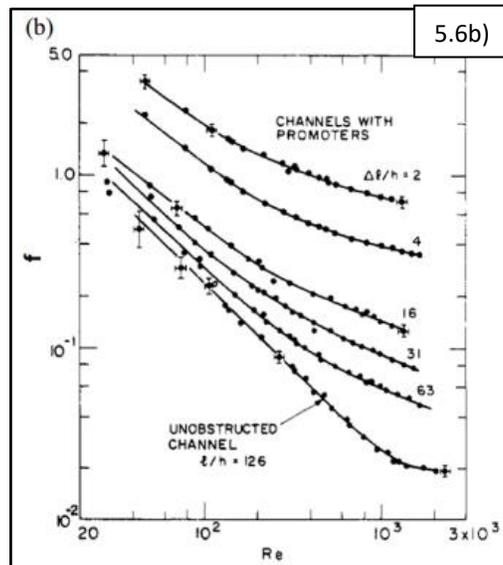


Figura 5.6b) Números de Reynolds más altos: datos experimentales sobre promotores de remolinos flotantes con diferentes relaciones entre altura y altura ($\Delta l/h$). Fuente: (Campione, 2018).

debido a efectos de inercia más altos. Por lo tanto, se enfatiza que las correlaciones como las de la ecuación 5.25, son más adecuado para ajustar rangos estrechos de Re , de manera similar al caso de Sh en Campione, 2018.

5.6. Modelos de procesos y herramientas de simulación para electrodiálisis y procesos relacionados

Como bien se ha descrito en algunos subtemas anteriores, para describir con precisión el proceso de ED (que es el caso el que se desarrollara el experimento de desalación) y desarrollar una simulación lo más real posible, se ocupan modelos matemáticos que incluyan otros aspectos de manera general o con más detalle.

Estos modelos matemáticos deben incluir el equilibrio de la membrana de la solución, la polarización de la concentración y el comportamiento del flujo de fluidos a lo largo de los canales, los fenómenos de transporte de masa y los balances de masa en los compartimentos, fenómenos eléctricos, etc. (Campione, 2018).

Hay una jerarquía de modelos, pero la primera clase de proceso, se caracteriza por un alto enfoque simplificado basado en ignorar la mayoría de los fenómenos no ideales (por ejemplo, DBL, efectos no óhmicos, difusión de sal, flujos de agua, etc.) y en el uso de ecuaciones de parámetros agrupados (es decir, el uso de concentraciones de compartimiento promedio para estimar todas las variables del proceso).

Los *modelos simplificados* se adoptan comúnmente para un primer diseño aproximado de equipos ED, permitiendo la estimación de cifras tales como el área de membrana requerida para un problema de separación dado, y para un análisis económico simplificado del proceso. En este caso, se aplican coeficientes empíricos para de alguna manera dar cuenta de todas las no-idealidades, a menudo resumidas por un simple factor de utilización actual (o eficiencia actual) (Campione, 2018).

Para la segunda clase, y más amplia, de modelos de proceso se divide en 2 subcategorías:

- a) *Modelos rigurosos basados en Nernst–Plank (N-P) o Stefan–Maxwell (S-M)*
- b) *Modelos semi-empíricos.*

Para los casos anteriores se tienen en cuenta los fenómenos no ideales y los modelos suelen incluir la masa para equilibrar las ecuaciones diferenciales en la descripción de la variación o parámetros del proceso a lo largo de la dirección del flujo, menciona Campione, 2019.

Se aborda que la *principal diferencia* entre las dos subcategorías es la *descripción matemática* de los fenómenos transmembrana.

Los *modelos basados en N-P* contienen ecuaciones rigurosas capaces de describir de forma casi predictiva de todos los fenómenos de transporte dentro de la

membrana en el nivel microscópico; pero cabe mencionar que, aunque incluso en este caso, algunas características de la membrana, tales como la difusividad de los iones, la movilidad de los iones, la densidad de carga fija, etc. tienen que basarse en información empírica.

Para simulación, comúnmente se lleva a cabo utilizando métodos de elementos finitos (o enfoques similares) y el modelo de procesos se fusiona prácticamente con modelos de termodinámica y la transferencia de masa, incluyendo la descripción de la dinámica de fluidos. Una limitación de este enfoque es la gran potencia computacional requerida para resolver el modelo, que limita la aplicación a geometrías de canal muy simples o a un dominio computacional muy pequeño, lo que hace que la herramienta sea inadecuada para propósitos de simulación de pila completa (Campione,2018).

En el caso de *modelos semi-empíricos*, por el contrario, se basan en un modelo multiescala, en el que los fenómenos de menor escala (como la transferencia de masa y comportamiento de flujo de fluidos, lo que lleva también a la caracterización de DBL) son descritos por medio de información empírica o teoría a pequeña escala, por ejemplo, mediante herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional. De este modo, también se puede tener en cuenta el efecto de la geometría de los espaciadores o los perfiles de la membrana. Los fenómenos de escala media y superior se describen mediante ecuaciones diferenciales para balances de masa y ecuaciones fenomenológicas algebraicas para flujos a través de la membrana, lo que permite el logro de la descripción a escala de planta (Campione,2018).

En la figura 5.7 se puede observar una representación gráfica de los modelos del proceso de clasificación:

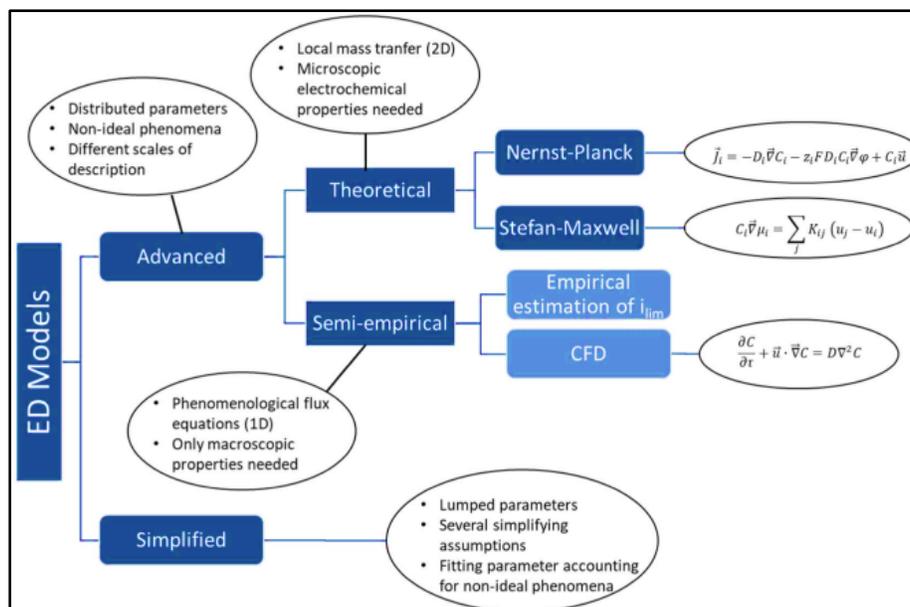


Figura 5.7 Diagrama de bloques que muestra la clasificación de las herramientas de modelado, junto con las principales características de cada clase de modelos. Fuente: (Campione,2018).

5.7. Modelos basados en Nernst-Planck

Como se sabe que en la simulación de transferencia de masa por la ecuación de Nernst-Planck, en fenómenos electroquímicos, los iones en solución electrolítica son partículas cargadas eléctricamente que interactúan entre sí, unas con otras, así como con el disolvente. Estas interacciones son bastante complejas y difícil de modelar, pero un enfoque efectivo pero simple conduce a la ecuación de Nernst-Planck, que comúnmente se adopta para describir el flujo iónico en procesos que tienen que ver con membranas.

El enfoque N-P enfoque es basado en el llamado principio de independencia de los flujos iónicos: la densidad de flujo de una especie i está determinada únicamente por su potencial gradiente de potencial electroquímico, y no por los gradientes de potencial electroquímico de otras especies. Esto significa que los coeficientes fenomenológicos cruzados se desprecian en las ecuaciones de transporte para las especies iónicas, es decir, se desprecian las interacciones de corto alcance entre los iones, mientras que solo se considera la interacción ion-solvente. Tal enfoque de Nernst-Planck es estrictamente aplicable solo a soluciones diluidas, donde la probabilidad de que dos iones se acerquen es relativamente pequeña (Campione,2018).

En su conjunto, el sistema completo de ecuaciones incluye el balance de masa de las especies iónicas, la conservación de la masa (ecuación de continuidad) y el momento (ecuaciones de Navier-Stokes), una condición para la densidad de carga neta (electroneutralidad o ley de Poisson) y una ecuación constitutiva que una densidad de corriente y flujo de iones (Campione,2018). En términos generales, la condición de electroneutralidad local simplemente se supone, lo que establece que la densidad de carga eléctrica local es nula en todas partes:

$$\sum_i z_i C_i = 0 \quad (5.26)$$

Al respecto, una relación más rigurosa es la ecuación de Poisson, que, para un medio constante dieléctrico uniforme ϵ , es:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{F}{\epsilon} \sum_i z_i C_i \quad (5.27)$$

Cuando se usa la ecuación de Poisson (en lugar de la electroneutralidad local) para cerrar el sistema, se obtiene el modelo Nernst-Planck-Poisson (N-P-P). La constante de proporcionalidad F/ϵ en ecuación 5.27, es bastante grande (para agua $\epsilon \approx 7.08 \times 10^{-10}$ F/m), de modo que una desviación despreciable de la electroneutralidad conduciría a una desviación considerable de cero del Laplaciano del potencial eléctrico. En otras palabras, una separación apreciable de carga

estaría asociada con fuerzas eléctricas muy grandes. Sin embargo, las desviaciones de la electroneutralidad local ocurren en la doble capa eléctrica en las interfaces IEM-solución o electrodo-solución y están confinados a una región muy estrecha (grosor de 1 a 10 nm). Sólo con corrientes que superan el límite, la carga espacial (o carga espacial extendida, ESC) se expande más allá de la doble capa eléctrica. En estas condiciones, la ecuación de Poisson es necesaria para la descripción de los fenómenos de transporte (Campione,2018).

5.7.1. Caída de voltaje sobre el par de celdas por el modelado de segmentación

Para la caída de voltaje total sobre un sistema multicapa de soluciones y membranas se puede evaluar como la suma de las diversas contribuciones proporcionadas por los elementos en serie en Campione,2018 y Campione, 2019. Se enuncia que ara un par de celdas, la ecuación 5.15 se puede reescribir de forma más compacta como:

$$\Delta V = \eta_{non-ohm} + r_{ohm}I \quad (5.28)$$

Donde:

$\eta_{non-ohm}$ es la caída de voltaje total no óhmica que ocurre en DBLs e IEMs que se mostró en la ecuación 5.19 y 5.20, I es la corriente eléctrica y r_{ohm} es la resistencia óhmica total.

En varios modelos, la resistencia óhmica de los compartimentos ha sido calculado en base a la concentración a granel de las soluciones (Campione,2018). Debido a esto, la resistencia del par de celdas óhmicas se puede expresar como:

$$r_{ohm} = r_{CEM} + r_{AEM} + r_c + r_D \quad (5.29)$$

Donde:

r_{CEM} y r_{AEM} son las resistencias de las IEM, mientras que r_c y r_D son las resistencias de los compartimentos concentrado y diluido, respectivamente, que puede evaluarse fácilmente como:

$$r_c = F_S \frac{h_D}{\lambda_C C_C} \quad (5.30)$$

$$r_D = F_S \frac{h_D}{\lambda_D C_D} \quad (5.31)$$

Donde:

F_S es un factor que explica el efecto de sombra debido al espaciador filamentos o perfiles de membrana, h es el espesor del compartimento, λ es la conductividad equivalente, C es la concentración aparente de electrolito.

La resistencia de membrana representa el término más difícil de estimar. Fidaleo derivó la resistencia de la membrana y el área eficaz de la membrana a partir de mediciones en una pila construida solo con CEM o AEM. A menudo, se utiliza un valor constante para la resistencia de la membrana (Campione,2018).

5.7.2. Balances de masa y transporte a través de membranas

Todas las ecuaciones relacionadas para el cálculo de la electricidad, las variables se pueden expresar como funciones de la coordenada x a lo largo de la dirección del flujo. Balances de masa y ecuaciones de transporte a través de las membranas permiten la variación de concentraciones y caudales a lo largo la dirección del flujo a calcular, proporcionando así toda la información necesarios para caracterizar el sistema a lo largo de toda su longitud. Siguiendo un enfoque similar al de Nernst–Planck, el transporte de iones dentro de la membrana se puede expresar como la suma de un flujo de conducción óhmico y un flujo de difusión de acuerdo con Campione, 2018, 2019 y 2020.

Entonces, las expresiones de los flujos de iones a través de las dos IEMs de un ED, el canal se puede generalizar para sales monovalentes como:

$$J_{cond}(x) = [t_+^{cem} - (1 - t_-^{aem})] \frac{i(x)}{F} \quad (5.32)$$

$$J_{diff}(x) = \frac{D_{cem}}{h_{cem}} [C_C^{cem}(x) - C_D^{cem}(x)] + \frac{D_{aem}}{h_{aem}} [C_C^{aem}(x) - C_D^{aem}(x)] \quad (5.33)$$

$$J_{tot}(x) = J_{cond}(x) + J_{diff}(x) \quad (5.34)$$

Donde:

t_+^{cem} y t_-^{aem} son los números de transporte de los contraiones dentro de las IEM, D_{aem} y D_{cem} son la permeabilidad a la sal (difusión) coeficientes a través de las IEM, h_{aem} y h_{cem} son los espesores de las IEMs, C_C^{cem} , C_D^{cem} , C_C^{aem} y C_D^{aem} son las concentraciones de electrolitos en las diversas interfaces IEM-solución (lado de la solución), i es la energía eléctrica.

Debido al hecho de que las membranas no son perfectamente permselectivas también hay un flujo de agua a través de ellos. Dos fenómenos contribuyen a esto, tales como: ósmosis y electroósmosis, y se puede cuantificar como:

$$J_{osm}(x) = L_{p,cem} [\pi_C^{cem}(x) - \pi_D^{cem}(x)] + L_{p,aem} [\pi_C^{aem}(x) - \pi_D^{aem}(x)] \quad (5.35)$$

$$J_{eosm}(x) = n_h J_{tot}(x) \quad (5.36)$$

$$J_w(x) = J_{osm}(x) + J_{eosm}(x) \quad (5.37)$$

Donde:

$L_{p,aem}$ y $L_{p,cem}$ son los coeficientes de permeabilidad al agua (osmótica) de IEMs, π_{SOL}^{iem} denota la presión osmótica de las soluciones en la interfase membrana-solución, n_h es el número de moléculas de agua en la capa de solvatación de las sales y J_w es el flujo molar total de agua (Campione,2018).

Algunos modelos ignoran totalmente los fenómenos osmóticos, otros simplifican la ecuación de $J_{osm}(x)$ usando solo un factor de proporcionalidad (L_p) para ambas IEM y/o las presiones osmóticas a granel en lugar de las de la interfase membrana-solución. En unidades de ED, ósmosis y electroósmosis son tanto del canal diluido al concentrado. Además, el flujo de agua a través de las membranas puede ser de importancia para el desempeño del proceso, especialmente en pilas con una gran área de membrana y largo tiempo de residencia (Campione,2018).

Entonces las ecuaciones de balance de masa unidimensional (globales y para el soluto) a lo largo de la dirección del flujo x se puede expresar mediante el siguiente diferencial ecuaciones:

$$\frac{dQ_D(x)C_D(x)}{dx} = -\frac{dQ_C(x)C_C(x)}{dx} = -b J_{tot}(x) \quad (5.38)$$

$$\frac{dQ_D(x)}{dx} = -\frac{dQ_C(x)}{dx} = -b J'_w(x) \quad (5.39)$$

Donde:

Q representa el caudal volumétrico, b el ancho de la membrana y J'_w el flujo volumétrico del solvente a través de las IEM. Para tomar en cuenta el efecto de la variación de la densidad de la solución en la ecuación $\frac{dQ_D(x)}{dx}$, se deben escribir balances de masa más rigurosos, aunque tal efecto es típicamente insignificante.

5.7.3. Aproximaciones complejas para fenómenos no óhmicos y transporte de masa modelos

Finalmente, todas las contribuciones de la DBL a la caída de tensión total (caída de tensión óhmica, potencial de difusión y sobrepotencial de concentración) puede calcularse como funciones logarítmicas de coeficientes de polarización. En general, en un par de celdas hay cuatro valores diferentes de coeficiente de polarización, uno para cada interfaz. A su vez, los coeficientes de polarización dependen de la densidad de corriente, el transporte de masa relacionado con la hidrodinámica, que se explica por el número de Sherwood, y números de transporte en membrana y en solución. Con frecuencia los fenómenos de transporte masivo dentro del canal han sido caracterizados por medidas experimentales (cronopotenciometría, EIS, límite densidad de corriente). Sin embargo, las características de la transferencia de masa han sido calculadas mediante simulación numérica de la ecuación de transporte convectivo difusivo del electrolito, prediciendo el número de Sherwood (Campione,2018).

Entonces, como se comentó anteriormente, bajo la condición de electroneutralidad local, a partir de las ecuaciones de Nernst-Planck de los dos iones de un electrolito binario, se puede obtener la ecuación conocida como transporte convectivo-difusivo:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} C = D \nabla^2 C \quad (5.40)$$

Donde:

C denota la concentración de electrolito.

5.7.4. Modelos simplificados para la simulación y diseño de sistemas ED

En Campione, 2018, se menciona que en 2002 se presentó una herramienta de diseño basada en un número de simplificar suposiciones y ecuaciones simples que permiten estimar las características principales de una pila ED, como la corriente eléctrica y la requerida área de la membrana para un voltaje aplicado fijo. Dicha fuente indica que, los principales supuestos son:

- ✓ Ambas celdas tienen geometrías y condiciones de flujo idénticas;
- ✓ La pila opera en un flujo a favor de la corriente;
- ✓ La unidad trabaja por debajo de la densidad de corriente límite;
- ✓ Se desprecia el potencial de membrana (fuerza contraelectromotriz);
- ✓ Se desprecia la polarización de concentración;
- ✓ Se desprecian la difusión de iones y el transporte de agua;
- ✓ El factor de utilización actual es fijo.

Con lo anterior, el *grado de desalinización* (es decir, la diferencia entre la entrada y la concentración de salida de la corriente diluida) puede expresarse como:

$$dC^\Delta = \frac{i\zeta N}{zFQ} dA \quad (5.41)$$

Donde:

C^Δ es el grado de desalinización, i es la densidad de corriente, ζ es el factor de utilización actual, N es el número de pares de celdas, z es la valencia, Q el caudal volumétrico y A es el área efectiva de la membrana.

Para la intensidad o densidad de corriente, lo denotan como:

$$i = \frac{k_{av}\Delta V}{2hN} \quad (5.42)$$

Donde:

ΔV es el voltaje aplicado, h es el espesor del canal y k_{av} es la conductividad eléctrica promedio, que se puede expresar en términos de conductividades de la solución y resistencias de membrana:

$$k_{av} = \frac{2h}{\frac{h}{k_C} + \frac{h}{k_D} + r_{AEM} + r_{CEM}} \quad (5.43)$$

Donde:

k_C es la conductividad del concentrado, k_D es la conductividad del diluido, r_{AEM} y r_{CEM} son las resistencias de la membrana.

Luego realizando una sustitución de las ecuaciones 5.42 y 5.43 en y en la ecuación 5.41, reorganizando e integrando esta ecuación (con las condiciones de contorno $C^\Delta = 0$ en $A = 0$ y $C^\Delta = C_D^f - C_D$ en el genérico A) para expresar el área efectiva en función de los demás parámetros, se tiene:

$$A = \left[\frac{h}{\lambda} \ln \frac{C_C C_D^f}{C_D C_C^f} + (r_{AEM} + r_{CEM})(C_D^f - C_D) \right] \frac{zFQ}{\zeta \Delta V} \quad (5.44)$$

Donde:

λ es la conductividad equivalente, C_C y C_D son las concentraciones de salida y C_C^f y C_D^f son las concentraciones de alimentación.

De igual manera se comenta que en el diseño práctico de una unidad ED, la longitud de la ruta del proceso puede ser derivado de esta ecuación cuando se trabaja por debajo del corriente límite de densidad e incluyendo un factor de corrección para tener en cuenta los efectos de sombra (Campione, 2018):

$$L_{prac} = \left[\frac{h}{\lambda} \ln \frac{C_C C_D^f}{C_D C_C^f} + (r_{AEM} + r_{CEM})(C_D^f - C_D) \right] \frac{zFQ_{prac}}{\zeta \Delta V F_S b} \quad (5.45)$$

Donde:

F_S es el factor de sombra, b es el ancho de celda y $Q_{prac} = Q\sigma$, con σ siendo un factor que expresa el % de volumen de fluido de una célula (es decir, la porosidad del espaciador).

Se comenta también que, otro ejemplo de modelo simplificado fue presentado en 2007 por Sadrzadeh. En este modelo empírico basado en una regresión, se utiliza una eficiencia actual para incluir todos los fenómenos que conducen a una utilización de corriente incompleta, sin considerar explícitamente los diversos aportes distintos al flujo migratorio para el traslado de masa a través de membranas (Campione, 2018).

De acuerdo a ello, el balance de masa se puede denotar como:

$$uh_D dC = \frac{\zeta I}{FA} dx \quad (5.46)$$

Donde:

u es la velocidad del fluido, h_D es el espesor del compartimiento de diluido, ζ es la eficiencia actual, F es la constante de Faraday, I es la corriente eléctrica, mientras que I/A representa la densidad de corriente y A es el área efectiva de una IEM, dC y dx representan la variación diferencial de concentración para un aumento diferencial en la longitud de la pila, respectivamente.

Además, las resistencias de membrana y los potenciales de Nernst no son calculado explícitamente, pero todo incluido en los parámetros de ajuste. El resultado es un modelo concentrado caracterizado por una única ecuación de diseño que da la concentración de diluido de salida en función de los diversos parámetros (Campione, 2018):

$$\frac{\beta Q^{\frac{2}{3}} h_D^2 F}{\Delta V A^{\frac{2}{3}}} f(C_0, C) = \int_0^1 dx \quad (5.47)$$

$$f(C_0, C) = \int_0^1 \frac{1}{C(12.64 - 8.92C^{0.5} + 8.21C)} dC \quad (5.48)$$

Donde:

Q es el caudal y β es un parámetro que se ajusta mediante datos experimentales, lo que da como resultado una función del caudal y la tensión aplicada.

Cabe mencionar que todas las ecuaciones descritas anteriormente fueron consultadas mayormente de las fuentes de Campione, 2018, Campione, 2019 y Campione, 2020, pero con mayor referencia en la primera respectivamente.

CAPÍTULO VI.

EXPERIMENTACIÓN DE DESALACIÓN DE AGUA MARINA CON MÉTODO DE ELECTRODIÁLISIS

Ninguna cantidad de experimentación puede probar definitivamente que tengo razón; pero un solo experimento puede probar que estoy equivocado.

Albert Einstein

6. EXPERIMENTACIÓN DE DESALACIÓN DE AGUA MARINA CON MÉTODO DE ELECTRODIÁLISIS

6.1. Marco teórico

Esta experimentación está enfocada en la desalinización, que consiste en el proceso de separación de las sales disueltas del agua de mar, donde se genera un agua producto o agua dulce, y un agua de rechazo o salmuera (Ahmad & Baddour, 2014; Dévora, González, & Ruíz, 2013; Valero, Uche, & Serra, 2001). Comúnmente, la técnica de desalinizar se ha realizado en varios volúmenes de agua, pero mayormente en aguas de menor salinidad que el agua de mar, por ejemplo, de agua salobre.

La desalinización se presenta como una alternativa de abastecimiento de agua en regiones con déficit de agua potable, ya que aporta un caudal externo al ciclo hidrológico de agua y no compite contra otros sistemas o los daña, como los trasvases que pueden deteriorar un ecosistema por reubicar cierto volumen de agua a otra región (Dévora, González, & Ruíz, 2013), lo que la ubica como una alternativa positiva. Además, los abundantes volúmenes de aguas marinas, pueden aportar una fuente inagotable que mediante el proceso de desalación permite disponer del agua producto para abastecer a diversos usuarios entre ellos a la población, la industria e inclusive a la agricultura (Dévora, González, & Ruíz, 2013).

A continuación, se describen algunos parámetros del agua y su importancia respectiva a este fluido. Se hace énfasis que, únicamente se medirán antes y después del proceso de electrodiálisis la Salinidad y la Conductividad Eléctrica.

6.2. Parámetros del agua que afectan al proceso

6.2.1. Salinidad

El término salinidad indica el contenido de gramos de sales disueltas por kilogramo de agua de mar (se utiliza la unidad de peso y no la de volumen porque este último depende más de la temperatura de lo que el peso depende de la aceleración de gravedad) o también indica la concentración de sales existentes en el agua salada.

Está claro que el agua del mar es evidentemente salada, entonces esta propiedad es fruto de la combinación de diferentes sales que se encuentran en el agua de mar, siendo las principales los iones cloruros (Cl^-), los iones carbonatos (CO_3^{2-}) y los sulfatos iones (SO_4^{2-}). De estas sales, la más abundante en cantidad es el cloruro de sodio (NaCl), conocido como la sal común, que constituye el 80% de las sales, el resto son otros componentes en diversas proporciones.

La salinidad se puede medir con un hidrómetro o un refractómetro. El hidrómetro mide la gravedad específica que puede convertirse a salinidad. El refractómetro mide la capacidad del agua para refractar la luz. Los científicos también miden la salinidad para determinar la cantidad de cloro en el agua salada. La salinidad se mide en gramos/litro (g/l) o partes por mil (ppt) en agua salada.

En la imagen 6.1 se aprecia el desglose de sales disueltas en una gota de agua marina.

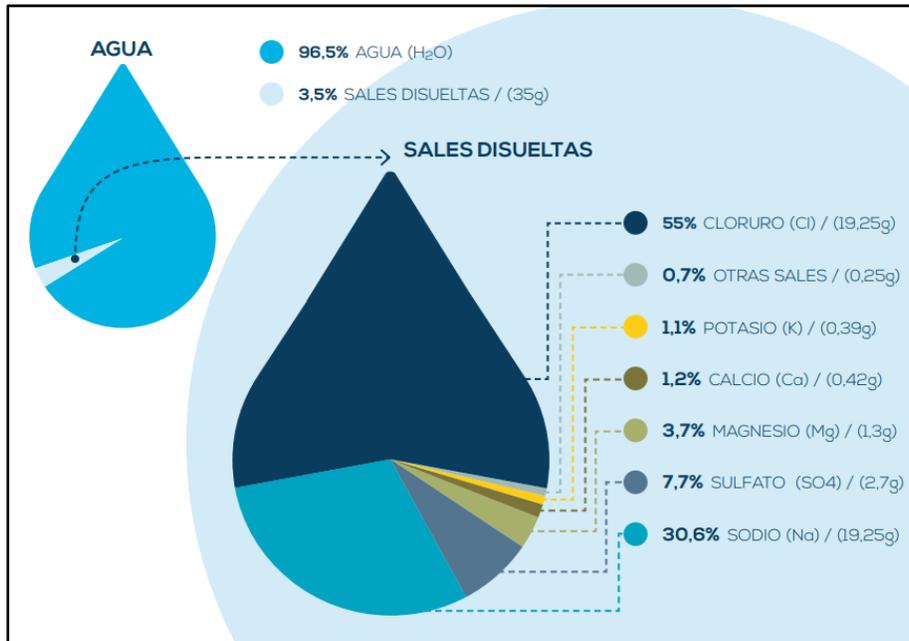


Figura 6.1 Sales disueltas en una gota de agua marina.

6.2.2. TDS

Las TDS son las materias sólidas que quedan en el agua después de haberse evaporado. Las unidades de TDS son miligramos por litro, partes por millón (ppm) o partes por mil (ppt). Algunas sondas de conductividad expresan los resultados en conductividad, así como las TDS. Estas sondas asumen una relación constante entre la conductividad y las TDS. En aguas dulces se utilizan con frecuencia las cantidades totales de sólidos disueltos en vez de la salinidad. Se mide filtrando una muestra, el agua filtrada se seca y los sólidos restantes se pesan.

6.2.3. Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética media de las moléculas de agua y se mide en una escala lineal de grados Centígrados o grados Fahrenheit. Es uno de los parámetros más importantes de la calidad de agua. La temperatura afecta la química del agua y las funciones de los organismos acuáticos.

Este parámetro del agua influye en:

- La cantidad de oxígeno que se puede disolver en el agua.
- La velocidad de fotosíntesis de las algas y otras plantas acuáticas.
- La velocidad metabólica de los organismos.
- La sensibilidad de organismos a desechos tóxicos, parásitos y enfermedades.

- Épocas de reproducción, migración y estivación de organismos acuáticos

Las propiedades térmicas del agua marina dependen del calor que absorbe de las radiaciones solares, y de la cantidad de calor que regresa del mar a la atmósfera. La temperatura del agua de mar se sitúa entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (aguas polares) y $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (en el mar Rojo). El rango de temperaturas en tierra es mayor y abarca desde los $-68\text{ }^{\circ}\text{C}$ (en Siberia) hasta los $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (alcanzados en el Valle de la Muerte, California). Otra relación con la temperatura del agua de mar, es que las sales disueltas hacen que baje su punto de congelación, evitando que gran parte del agua del planeta sea sólida.

6.2.4. pH

El pH es una medida que indica la acidez o la alcalinidad de una solución, en este caso del agua. Se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica, equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno.

Por otro lado, las causas que originan un cambio del pH son:

- a) *La Capacidad de obstáculo*: es un cojín químico que neutraliza los ácidos o las bases cuando son agregados al agua, algunos ejemplos de estas obstrucciones son el dióxido de carbono (CO_2) del aire se disuelve en el agua y forma un cojín (ácido carbónico H_2CO_3); los minerales de calcio y magnesio que provienen de las rocas como la piedra caliza que se disuelven en el agua.
- b) La entrada de sustancias básicas o ácidas (sintéticas o naturales): el pH puede cambiar a causa de entradas externas. Se puede medir una diferencia en el pH en una corriente de agua debido a un cambio en el tipo de árbol, por ejemplo, las agujas de conífero son ácidas y las hojas de arce son básicas; un cambio en la materia del fondo de la corriente, así como grava contra cieno o contra roca de fondo; un cambio elevado en la temperatura, en particular un cambio de actividad humana que afecta la corriente.

Otro factor que altera el pH en el agua, es la temperatura. Un aumento en la temperatura hace disminuir el pH. También las aguas con crecimiento elevado de algas pueden mostrar un cambio diurno en el pH. Cuando las algas crecen y se reproducen usan CO_2 . Esta reducción hace que el pH aumente. Por lo tanto, si las condiciones son favorables para el crecimiento de algas cuando la luz del sol entibia la temperatura, el agua será más alcalina. El pH máximo ocurre generalmente por la tarde, el pH desciende por la noche. Puesto que el crecimiento de las algas está sujeto a la luz que penetra en las zonas, el pH puede variar en función de la profundidad en lagos, estuarios, agua de bahías y océanos. Los desperdicios sintéticos arrojados al agua reducen el pH como la lluvia ácida que proviene de

desechos industriales, automotrices y drenajes mineros. Los nutrientes pueden afectar indirectamente al pH y estimular el crecimiento de las algas.

Finalmente, pH con valor de 7 que es el valor medio, 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 ácidas y valores por encima indican soluciones básicas o alcalinas. Con respecto al pH del agua de mar es generalmente entre 7.5 y 8.4. En agua dulce, un pH con un valor de 6.5 a 8.5 protegerá a la mayoría de los organismos. Sin embargo, el valor del pH tolerado por diferentes organismos varía dependiendo del hábitat en que se encuentren.

6.2.5. Conductividad eléctrica

La conductividad es una medida de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir energía eléctrica y varía con la temperatura. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. Las soluciones de la mayor parte de los compuestos inorgánicos son buenas conductoras. Las moléculas orgánicas al no disociarse en el agua, conducen la corriente en muy baja escala.

De acuerdo con la nomenclatura establecida por Faraday, existen dos tipos de conductores, los de primera clase, son los metales, los cuales transfieren esta energía a través del flujo de electrones y los de segunda clase, se refieren a las disoluciones de electrolitos, éstos transportan masa y energía por medio del movimiento de iones.

La conductividad en medios líquidos (disolución) está relacionada con la presencia de sales en la solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos.

6.2.6. Potencial redox

El potencial redox es una forma de medir la energía química de oxidación-reducción mediante un electrodo, convirtiéndola en energía eléctrica. El potencial redox es positivo cuando se produce una oxidación y negativo cuando se produce una reducción. Normalmente, las reacciones redox vienen acompañadas de cambios de pH en el medio.

Al proceso complementario de oxidación-reducción se le conoce como redox y el valor ORP es la medida en voltios o milivoltios de la actividad del electrón comparado con la actividad de un electrodo de referencia, que mantiene siempre el potencial constante.

6.2.7. Densidad relativa

La *densidad*, también llamada densidad absoluta y masa específica, se define como la masa por unidad de volumen, que es igual al cociente entre la masa de un cuerpo

(kg) y su volumen (m^3), sus unidades dimensionales son kg/m^3 en el Sistema Internacional de Unidades, SI.

En los líquidos el volumen varía mucho con la temperatura y poco con la presión, y lo mismo ocurre con su densidad. Cuando aumenta la temperatura aumenta el volumen y, si no varía la masa, disminuye el valor de la densidad. Por ello en las tablas de densidades debe especificarse la temperatura a la que se determinó cada valor de densidad del líquido. Y si la medimos también hay que tener en cuenta la temperatura del líquido en el momento de la medición.

Un concepto muy distinto al anterior es la *densidad relativa*, que se define como el cociente entre la densidad de un cuerpo y la de otro que se toma como unidad, en otras palabras, es una magnitud que relaciona la densidad absoluta de un líquido con respecto a la densidad absoluta de una sustancia de referencia como por ejemplo agua destilada y el resultado es que la densidad relativa carece de unidades (adimensional).

Si el cuerpo que se toma como unidad es agua a $20^\circ C$, cuya densidad vale 0.998 g/cm^3 podremos también expresar la densidad relativa (d.r. $20^\circ C/20^\circ C$) de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa } 20^\circ C/20^\circ C = \frac{\text{Densidad del cuerpo a } 20^\circ C \text{ en } g/cm^3}{\text{Densidad del agua a } 20^\circ C \text{ en } g/cm^3}$$

$$\text{Densidad relativa } 20^\circ C/20^\circ C = \frac{\text{Densidad del cuerpo a } 20^\circ C \text{ en } g/cm^3}{0.998\text{ g/cm}^3}$$

6.3. Diseño experimental

6.3.1. Equipo y material

- ✓ Conductímetro HI8733 y refractómetro de Compensación Automática de Temperatura (ATC).
- ✓ Energía eléctrica y fuente de poder.
- ✓ Celda electrolítica.
- ✓ Mangueras para la circulación del agua a través de la celda.
- ✓ 6 litros de agua marina.
- ✓ Recipiente de 1000 mililitros.
- ✓ Vasos de precipitado de 2 litros.
- ✓ Agua destilada.
- ✓ Varilla de vidrio.

6.3.2. Desarrollo

Se hizo la experimentación de una muestra de agua marina de aproximadamente 6 litros de volumen con una celda de electrolítica, extrayendo la sal principal por la cual está constituida (NaCl).

6.3.2.1. Procedimiento de recolección y pretratamiento de la muestra para realizar la experimentación.

1. Se realizó una visita a la Playa Puerto Angelito, ubicada en la costa Oaxaqueña de Puerto Escondido, para recolectar la muestra de agua requerida para la experimentación, en seguida se muestra el lugar físico.

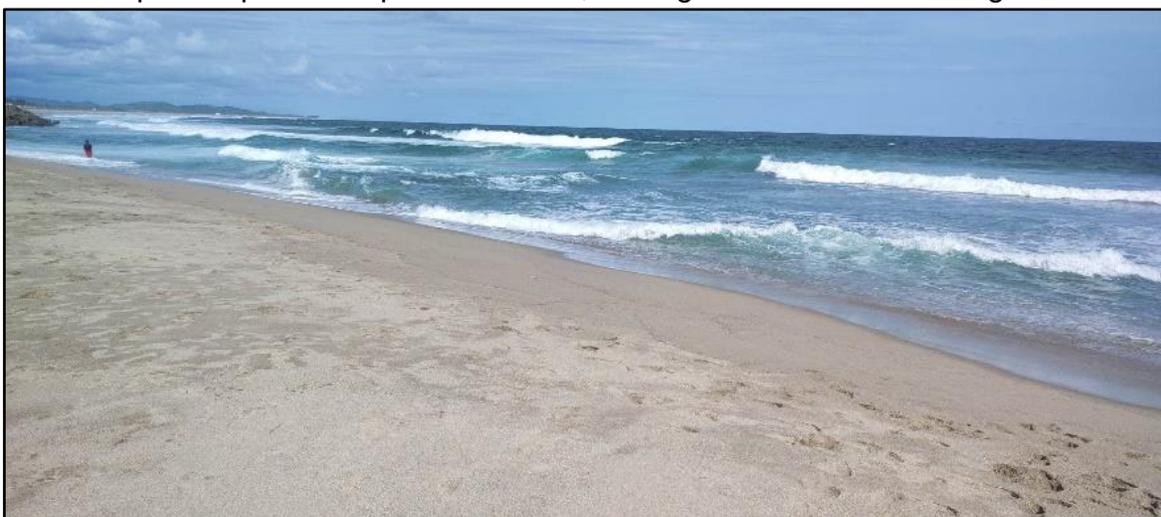


Figura 6.2 Playa Puerto Angelito, Oaxaca, México.

2. Con ayuda de una brigada de 3 personas, nativos del lugar, se comenzó la búsqueda de la muestra de agua marina mar adentro.



Figura 6.3 Nativos de Playa Puerto Angelito.

3. Después de una hora, se finalizó la obtención de la muestra en campo.



Figura 6.4 Brigada en la costa, finalizando la toma de muestra.

4. El recipiente que se ocupó para tomar la muestra de agua, tiene una capacidad de 20 litros, de los cuales se llenaron aproximadamente 15 litros.

5. Después de tener la muestra de agua en tierra, se procedió a tomar una pequeña submuestra para medir los parámetros que tenía en ese momento con el aparato Water Quality Tester Modelo BLE-C600.



Figura 6.5 Cuantificación de los parámetros con el aparato de medición.

6. De igual manera se realizó la medición de la Salinidad del agua en campo, con el aparato Refractómetro, así como se muestra en la figura 6.6a) y 6.6b).



Figura 6.6a) Medición de la Salinidad con el Refractómetro. Figura 6.6b) Acercamiento de la medición con el Refractómetro.

7. Posteriormente de la muestra de 15 litros, se separó otra submuestra de 6 litros para llevarla al Instituto de Ingeniería UNAM y realizar la experimentación en el laboratorio.
8. Cuando la muestra se encontraba en la Ciudad de México, se comenzó el proceso de pretratamiento del agua marina. Antes de hacerla pasar por la celda electrolítica se retiraron los sólidos, los coloides, impurezas en suspensión y organismos vivos que pudiera tener la muestra de agua. En la figura 6.8a) se muestra un método físico de pretratamiento que se llama *decantación*, que sirve para separar componentes de distinta densidad situándose el más denso en el fondo por efecto de la gravedad y quedando el agua clarificada por encima de este material (figura 6.8b)). En este caso, el material que se pudo separar fue la arena fina de la playa que venía acompañada del líquido, quedando en la parte inferior. Cabe mencionar que desde que se extrajo la muestra en campo y hasta el término (a consideración propia) de la decantación, tuvo una duración de 15 días.



Figura 6.7a) Medición de la Salinidad con el Refractómetro. Figura 6.7b) Separación del agua marina y la arena.

9. Después se implementó otro proceso que se llama filtración ordinaria, en el cual se utilizaron algunos tamices para “colar” el agua marina y limpiarla aún más de los sólidos o de la materia orgánica que pudo dejar el procedimiento anterior. En la figura 6.8a) se muestra la colocación del tamiz en un recipiente para llevar a cabo el proceso, y en la figura 6.8b) el vaciado de la muestra para la respectiva filtración.



Figura 6.8a) Colocación del tamiz en el recipiente. Figura 6.8b) Vaciado de la muestra para el filtrado.

10. En las figuras 6.9a) y 6.9b) se muestra la finalización del proceso de filtración, así como el residuo de los sólidos de arena que se encontraban inmersos en la muestra.



Figura 6.9a) Finalización del proceso de filtrado. Figura 6.9b) Residuos sólidos atrapados en el tamiz.

11. La muestra final, de 6 litros (2 recipientes de 3 litros cada uno) se presenta en las figuras 6.10a) y 6.10b).



Figura 6.10a) Muestra final lista para ser vaciada. Figura 6.10b) Muestra final de 3 litros de agua marina.

12. Ya teniendo listo el volumen de agua marina, se procedió a la experimentación de Electrodiálisis.

6.3.2.2. Configuración del experimento de Electrodiálisis

6.3.2.2.1. Membranas

En este trabajo se utilizaron membranas de intercambio aniónico (AEM) y membranas de intercambio catiónico (CEM). Ambas membranas se adquirieron de desarrollos Fujifilm y empresa cuyo objeto es producir membranas de intercambio iónico de alta calidad que puedan adaptarse a una variedad de aplicaciones e industrias; en este caso, se utilizó para la tecnología de electroseparación (electrodiálisis) para la desalinización de agua marina.

De acuerdo a la ficha técnica proporcionada por el fabricante, las membranas son del tipo 10, las cuales son materiales de bajo consumo de energía y media penetración de agua, en un rango de pH de 1-13. Las aplicaciones más utilizadas son para procesos de purificación de agua residual, agua salobre, flujo de alimentos mediante tecnología de electrodiálisis (ED) y desalación de agua de mar.

En el ANEXO A, se presenta una tabla de las características técnicas de las membranas de intercambio iónico (IEMs).

6.3.2.2.2. Electroodos

También se utilizaron electrodos de dimensiones estables elaborados de titanio con revestimiento de rutenio e iridio (Ti/ RuO₂-IrO₂), de la marca Magneto Special Anodes, con un área geométrica de 3x10 cm². Se evaluaron los electrodos con una solución como electrolito de sulfato de potasio (K₂SO₄), a 0.05 mol/L. Se utilizó K₂SO₄ para no generar productos tóxicos y ni riesgos para la salud.

6.3.2.2.3. Bomba peristáltica

En este estudio se utilizó una bomba peristáltica modelo 323S con manguera de 4.8 mm de diámetro, de la marca Watson-Marlow Pumps, en el ANEXO B, se muestran con más detalle la ficha técnica de la bomba.

6.3.2.2.4. Aditamentos adicionales

Para el armado de la celda electrolítica, se usaron materiales adicionales como tornillos, tuercas, juntas de presión, plásticos especiales y un regulador de energía.

6.3.2.2.5. Solución de enjuague

Para preparar la solución de enjuague (0.2 L) que se utilizó, sulfato de potasio (K₄SO₄) a 0.25 M, ferrocianuro de potasio (K₄[Fe(CN)₆]) a 0.05 M y ferricianuro (K₃[Fe(CN)₆]) a 0.05 M, (figura 6.11).

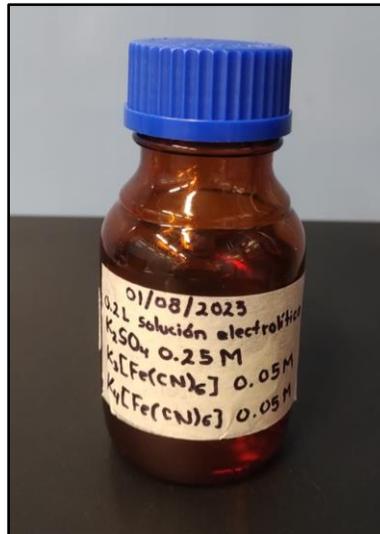


Figura 6.11 Solución electrolítica.

6.3.2.2.6. Voltaje, gasto y velocidad

De acuerdo con la figura 6.18, obtenida de la literatura Fabao, 2017, se propuso que el caudal de alimentación fuera de 10 ml/min, y el voltaje de 1.2 V y posteriormente se llevó a 3.0, 4.50 y 6.0 V, ya que para el caso de esta tesis se empleó una celda unitaria. Con dicho gasto se aseguró también que el flujo se mantiene en el rango laminar; entonces, para un volumen de 2000 ml de agua marina (elegido para la desalación), la velocidad del flujo en todo el proceso es de 0.92 cm/s.

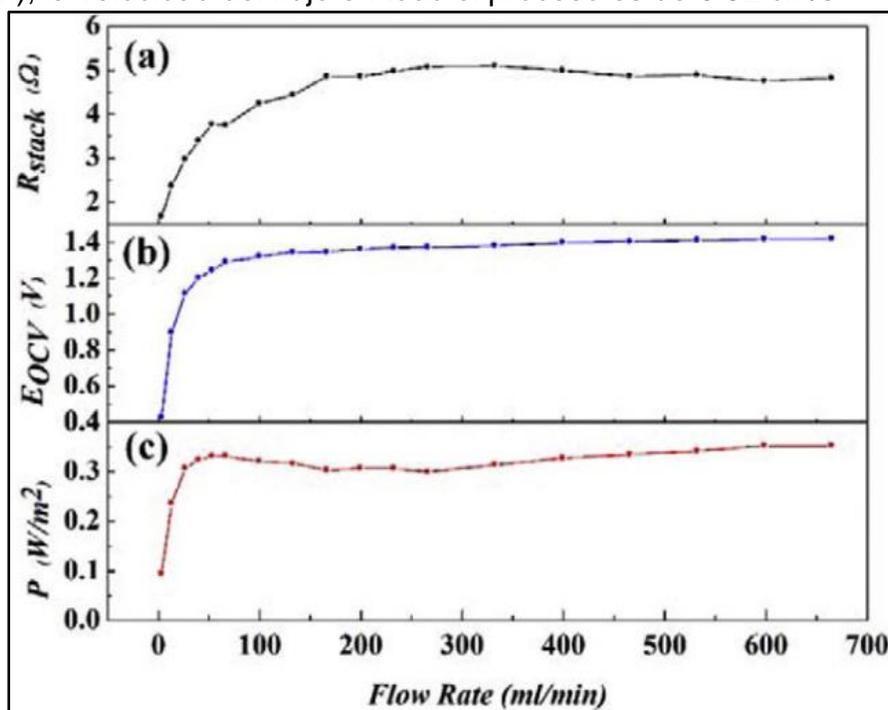


Figura 6.12 Influencia del caudal en el rendimiento de RED. Fuente: Fabao, 2017.

6.3.2.3. Construcción de la Celda Electrolítica

La celda electrolítica utilizada para los ensayos del presente estudio, fue proporcionada por el Instituto de Ingeniería UNAM. Esta celda tiene dimensiones de 3x10 cm, con área efectiva de 30 cm² (figura 6.19), y fue utilizada para evaluar únicamente dos parámetros, que son la salinidad y la conductividad eléctrica.

6.3.2.4. Pruebas de fugas

El primer paso es cargar la celda con agua para verificar la ausencia de fugas.

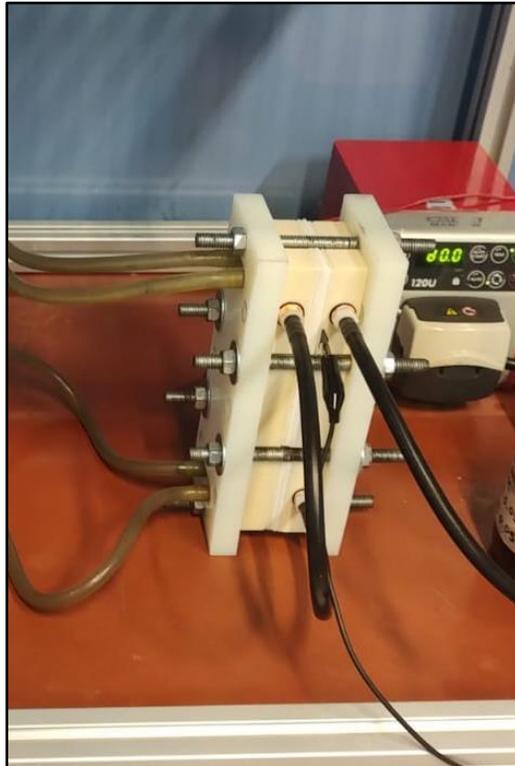


Figura 6.13 Celda Electrolítica construida en el Instituto de Ingeniería UNAM.

La celda se dejó funcionando alrededor de 24 horas para asegurar que el ensamble fue el correcto. En la figura 6.14a) y 6.14b) se visualiza el monitoreo con más detalle de la circulación de agua de prueba, evidentemente este paso es la base más importante para ejecutar la prueba.

Pasado ese tiempo, se determinó que estaba en óptimas condiciones para la experimentación.

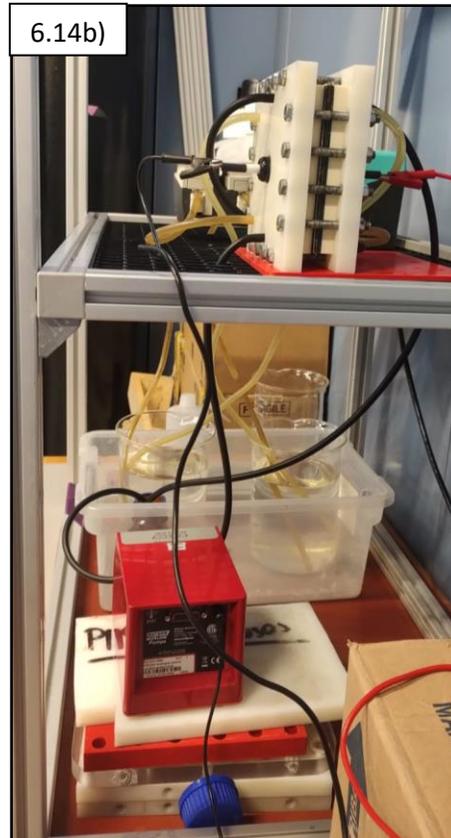
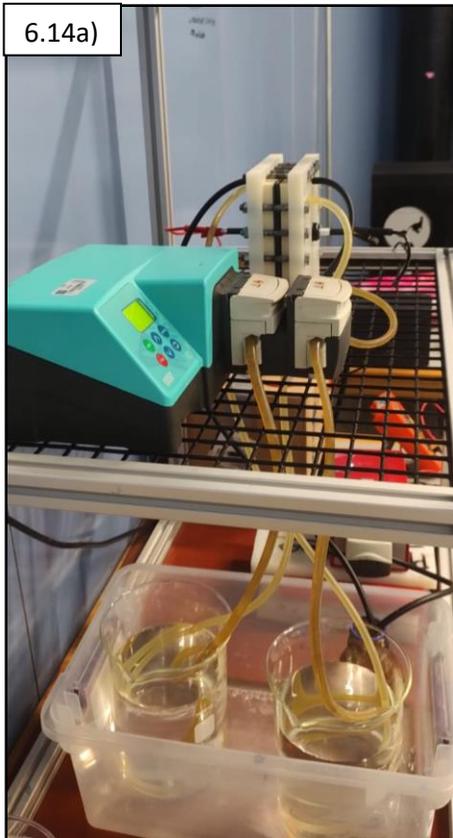


Figura 6.14a) Monitoreo de las pruebas de fugas del lado izquierdo y 6.14b) del lado derecho.

6.3.2.5. Toma de lecturas de los parámetros del agua

Se propuso tomar la lectura de parámetros a cada 10 minutos en un tiempo total de 1 hora; es decir, 6 mediciones de 10 minutos. En cada etapa se registró la concentración de sal en el agua diluida y en la concentrada (salmuera) así como la Conductividad Eléctrica. Se hace énfasis en que, este proceso de desalación del agua es por lote, es decir, el agua se recircula continuamente por un determinado tiempo, en este caso 1 hora.

En la tabla 6.1, 6.2 y 6.3, se presenta un resumen de las etapas de medición con los tiempos del proceso de la experimentación a diferentes voltajes.

Tabla 6.1 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 3.0 V.

Volumen (ml)	Voltaje (V)	Gasto (ml/min)	Velocidad (cm/s)	Tiempo estimado (min)
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10
Primera medición de los parámetros				
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10
Segunda medición de los parámetros				
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10

Tercera medición de los parámetros				
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10
Cuarta medición de los parámetros				
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10
Quinta medición de los parámetros				
1000 y 1000	3.0	10	0.92	10
Sexta medición de los parámetros				

Tabla 6.2 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 4.5 V.

Volumen (ml)	Voltaje (V)	Gasto (ml/min)	Velocidad (cm/s)	Tiempo estimado (min)
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Primera medición de los parámetros				
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Segunda medición de los parámetros				
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Tercera medición de los parámetros				
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Cuarta medición de los parámetros				
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Quinta medición de los parámetros				
1000 y 1000	4.5	10	0.92	10
Sexta medición de los parámetros				

Tabla 6.3 Proceso de los Tiempos de Medición en la Prueba de Desalación, a 6.0 V.

Volumen (ml)	Voltaje (V)	Gasto (ml/min)	Velocidad (cm/s)	Tiempo estimado (min)
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Primera medición de los parámetros				
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Segunda medición de los parámetros				
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Tercera medición de los parámetros				
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Cuarta medición de los parámetros				
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Quinta medición de los parámetros				
1000 y 1000	6.0	10	0.92	10
Sexta medición de los parámetros				

6.3.2.6. Diagramas del proceso de desalación de agua marina

Para prever el funcionamiento de la prueba, se realizaron algunos esquemas, desde que se carga la celda con las muestras de agua en dos recipientes (cada uno con 1000 ml) y la solución de enjuague de 200 ml, en un tiempo de 0 s, 1 s y así sucesivamente hasta finalizar el tiempo de 1 hora.

Se reitera que los diagramas fueron realizados en un escenario ideal, por lo que esto iba a comprobarse en la experimentación real, si se llegaba a presentar algún inconveniente en el proceso, se manifestaría por escrito.

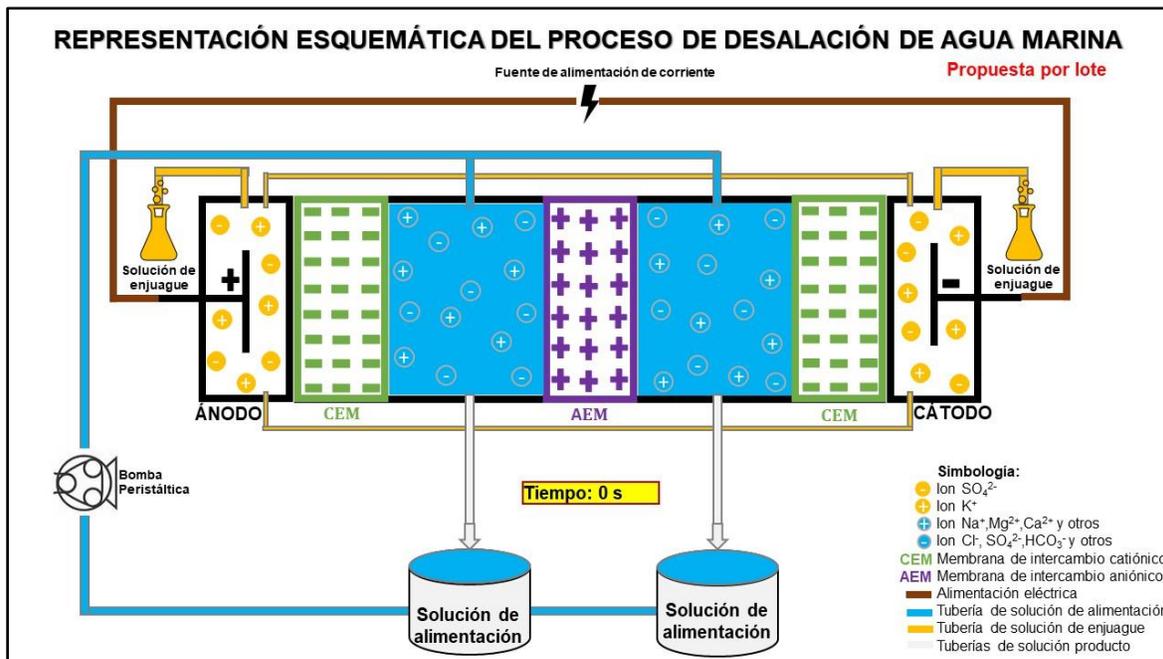


Figura 6.15 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 0 s.

La figura 6.15 muestra el sistema de manera esquemática y en la figura 6.16 se ve en la realidad.

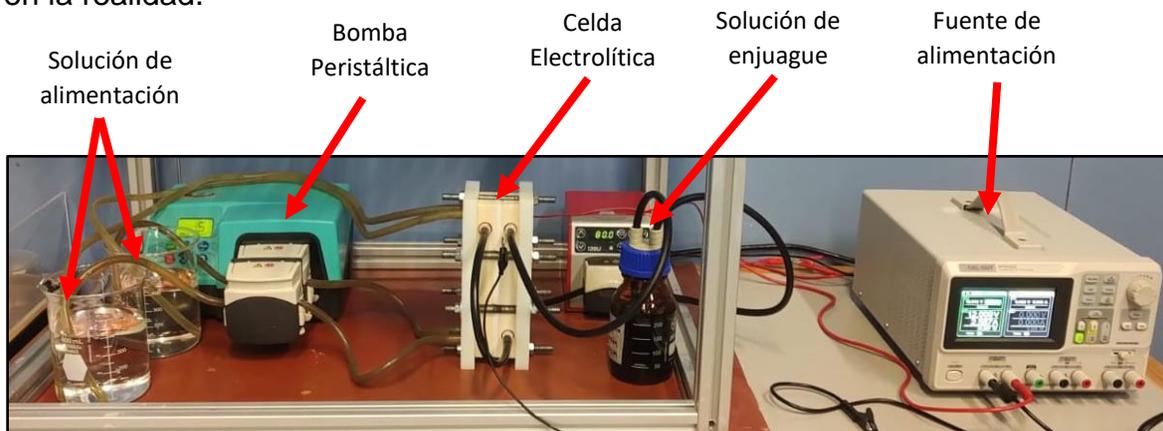


Figura 6.16 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 0 s.

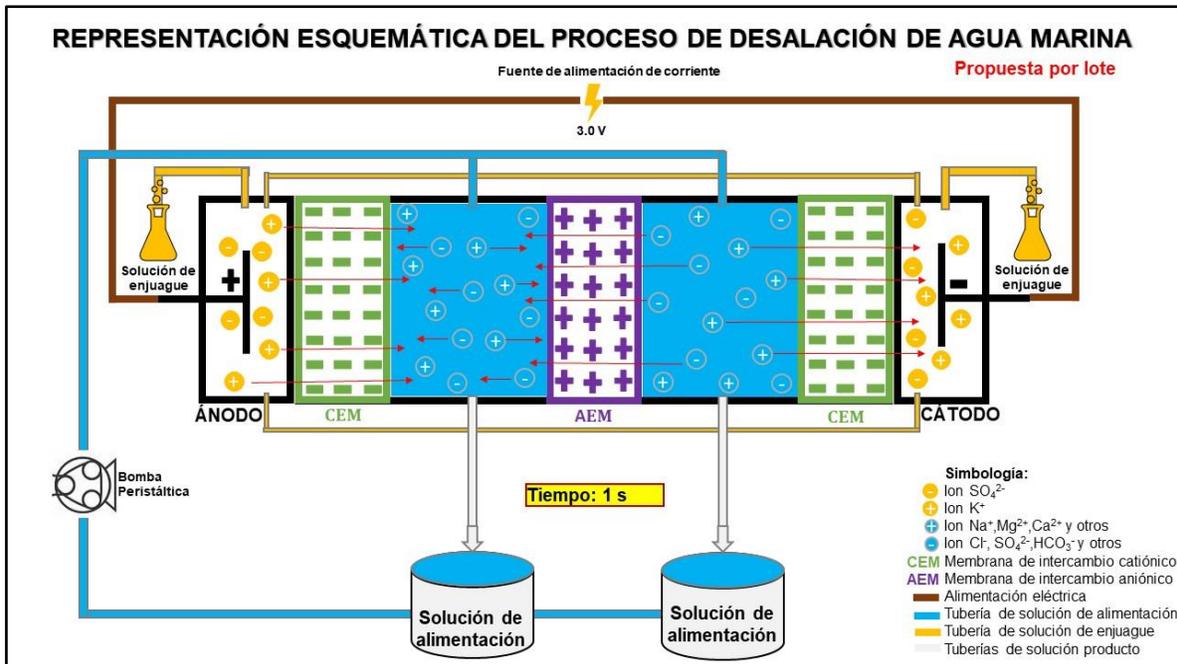


Figura 6.17 Esquema del proceso de desalación en un tiempo de 1 s a más.

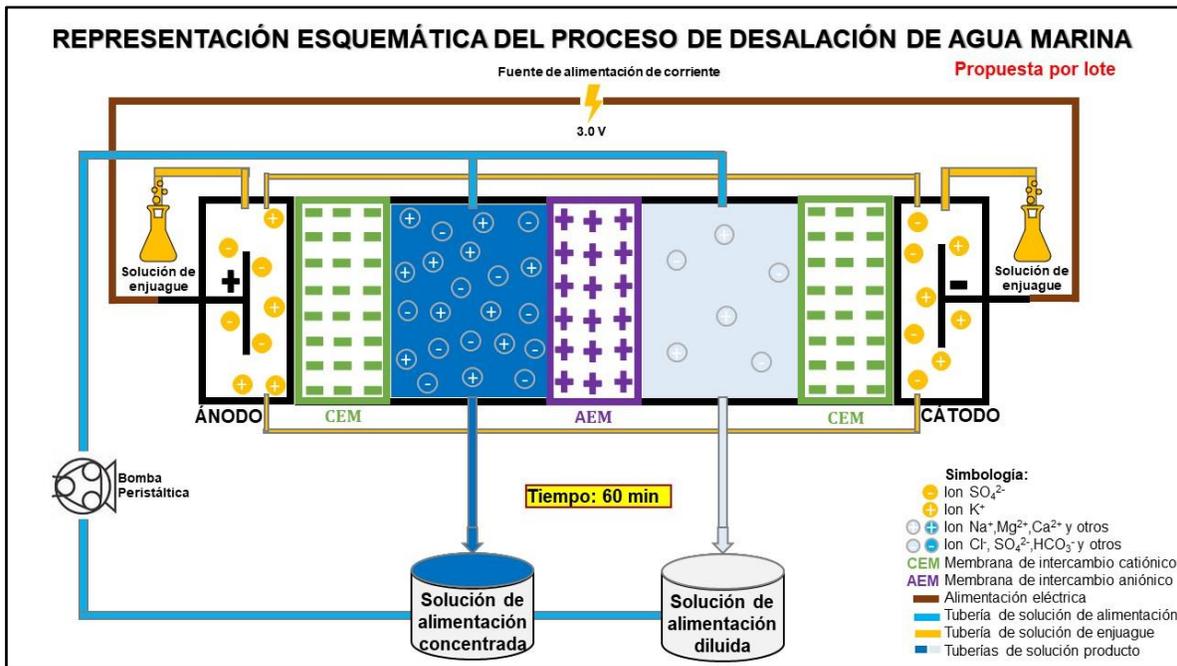


Figura 6.18 Esquema del proceso de desalación al finalizar el tiempo programado de 1 hora.

Como se puede observar, en el esquema de la figura 6.17, al aplicar el voltaje y recircular el agua a través de la celda, las partículas de agua y sal que están mezcladas en toda la solución de alimentación, comienzan a disociarse en el

momento en que pasa por el compartimento de entrada, esto es posible gracias al campo eléctrico continuo que actúa como fuerza directora, los iones se mueven y pasan o no a través de las Membranas de Intercambio Iónico (IEMs) según sea el caso; después de un cierto tiempo, uno de los dos recipientes va perdiendo sal y el otro va ganándola, en esos momentos se puede identificar con más exactitud cual es la salida diluida y la concentrada (salmuera), como se ve en la figura 6.18.

6.3.2.7. Experimento de desalación de agua marina

En principio se determinaron los parámetros con el Conductímetro y con el Refractómetro para medir específicamente la Conductividad Eléctrica y la Salinidad de la muestra de agua marina (tiempo 0 en el laboratorio), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 6.4 Parámetros de la Muestra de Agua Marina Antes de Recircularla en la Celda Electrolítica.

Parámetros arrojados por los aparatos de medición	
EC	47.5 y 47.4 mS/cm
SALT	33.25 y 33.18 ppt

Donde:

EC= Conductividad Eléctrica, sus unidades son milisiemens por centímetro (mS/cm).

SALT= Salinidad, sus unidades son partes por mil (ppt) o partes por millón (ppm).

Después de haber verificado la lectura de los parámetros, se inició con la experimentación de desalación de agua marina (Figura 6.19).

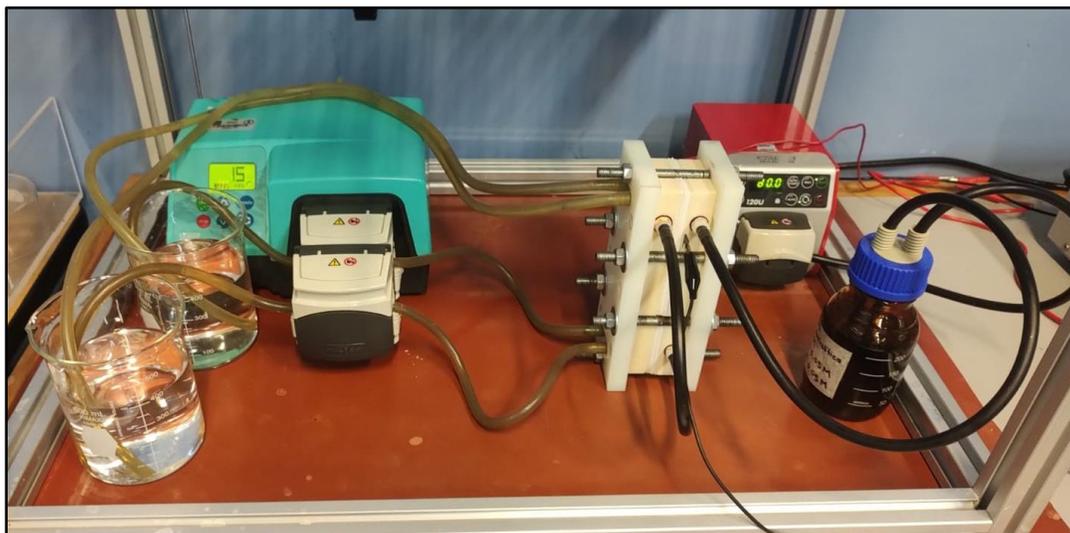


Figura 6.19 Proceso de desalación de agua marina.

En la figura 6.19 se muestra el momento en que estuvo en operación la celda electrolítica a un voltaje de 3.0, 4.50 y 6.0, y en las figuras 6.20a), 6.20b) y 6.20c) se visualiza la fuente de alimentación indicando los voltios suministrados, la intensidad de corriente y la potencia eléctrica.



Figura 6.20a) Fuente de alimentación con 3.0 V. Figura 6.20b) Fuente de alimentación con 4.5 V. Figura 6.20c) Fuente de alimentación con 6.0 V.

6.4. Obtención de resultados

Al finalizar cada una de las pruebas y anotar todas las mediciones (después de cada hora), se procedió a organizar la información obtenida en el experimento, una de agua concentrada (salmuera) y otra de agua diluida. Para calcular la salinidad en ppt a partir de la conductividad eléctrica (EC), se multiplica por un factor de 0.64 para agua salobre y para agua marina de 0.7. Las tablas 6.5, 6.6 y 6.7 indican los resultados a un voltaje de 3.0, 4.50 y 6.0 respectivamente.

Tabla 6.5 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 3.0 V.

Velocidad de bombeo	15 RPM			
Voltaje	3.0 volts			
Corriente	0.063 amperios			
Tiempo (min)	Recipiente con agua concentrada (SALMUERA)		Recipiente con agua diluida	
	EC (mS/cm)	SALT (ppt)	EC (mS/cm)	SALT (ppt)
0	47.50	33.25	47.50	33.25
10	48.40	33.88	47.20	33.04
20	48.80	34.16	47.00	32.90
30	49.40	34.58	46.60	32.62
40	49.90	34.93	46.20	32.34
50	50.00	35.00	46.00	32.20
60	50.30	35.21	45.80	32.06

Tabla 6.6 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 4.50 V.

Velocidad de bombeo	15 RPM			
Voltaje	4.5 volts			
Corriente	0.16 amperios			
Tiempo (min)	Recipiente con agua concentrada (SALMUERA)		Recipiente con agua diluida	
	EC (mS/cm)	SALT (ppt)	EC (mS/cm)	SALT (ppt)
0	47.40	33.18	47.40	33.18
10	47.90	33.53	47.00	32.90
20	48.30	33.81	46.50	32.55
30	49.60	34.72	45.50	31.85
40	50.10	35.07	44.70	31.29
50	50.50	35.35	44.10	30.87
60	50.90	35.63	43.60	30.52

Tabla 6.7 Lecturas de los Recipientes con Agua Concentrada (Salmuera) y agua diluida, a 6.0 V.

Velocidad de bombeo	15 RPM			
Voltaje	6.0 volts			
Corriente	0.36 amperios			
Tiempo (min)	Recipiente con agua concentrada (SALMUERA)		Recipiente con agua diluida	
	EC (mS/cm)	SALT (ppt)	EC (mS/cm)	SALT (ppt)
0	47.40	33.18	47.40	33.18
10	48.10	33.67	46.80	32.76
20	48.50	33.95	46.20	32.34
30	48.90	34.23	45.30	31.71
40	49.50	34.65	44.50	31.15
50	50.70	35.49	43.70	30.59
60	51.50	36.05	42.40	29.68

Posteriormente, se presentan los resultados en esquemas, para una mejor visualización del cambio en sus parámetros, que se va obteniendo a lo largo de la prueba en la muestra de agua marina, en un tiempo total de 1 hora, y a los voltajes antes mencionados.

De igual forma se compara las gráficas de los dos recipientes (diluido y salmuera).

En la figura 6.29, se pueden ver los puntos coordenados de tiempo y Conductividad Eléctrica, representados en una gráfica que se fueron midiendo en cada recipiente a intervalos de 10 minutos, desde un tiempo inicial de 0 hasta 60 minutos.

A un voltaje de 1.2 los electrodos comenzaron a polarizarse y la fuerza de su campo eléctrico era muy pequeña que no lograba disociar los iones, esto quería decir que necesitaba más voltaje para que la separación de las partículas fuera más notoria. Se aumentó el voltaje a 3.0 y en las mediciones de Conductividad Eléctrica se pudo apreciar los cambios, aumentando en el recipiente concentrado de 47.50 mS/cm hasta 50.30 mS/cm y disminuyendo en el diluido de 47.50 mS/cm hasta 45.80 mS/cm, así como se aprecia en la figura 6.21.

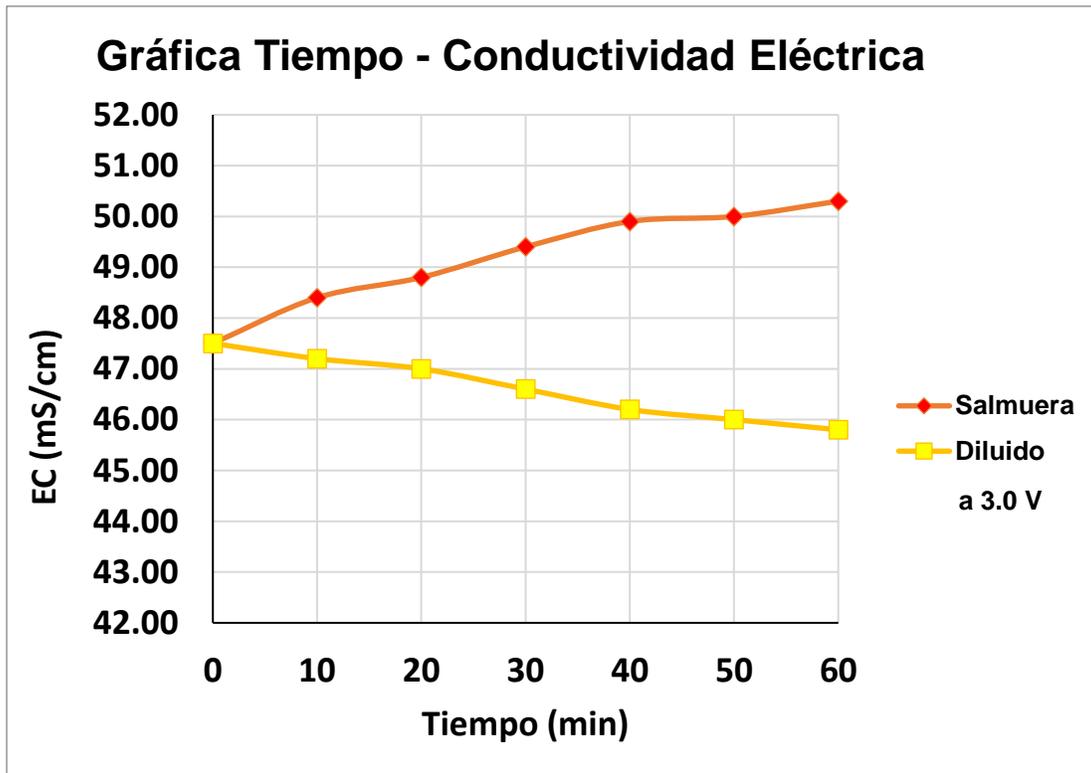


Figura 6.21 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 3.0 V.

Para el caso de la experimentación a 4.50 y 6.0 voltios, se comenzó con una lectura uniforme de 47.40 mS/cm llegando hasta 50.90 y 51.50 mS/cm respectivamente; los datos se pueden corroborar en la tabla 6.6 y 6.7 así como su representación en las gráficas de la figura 6.22 y 6.23.

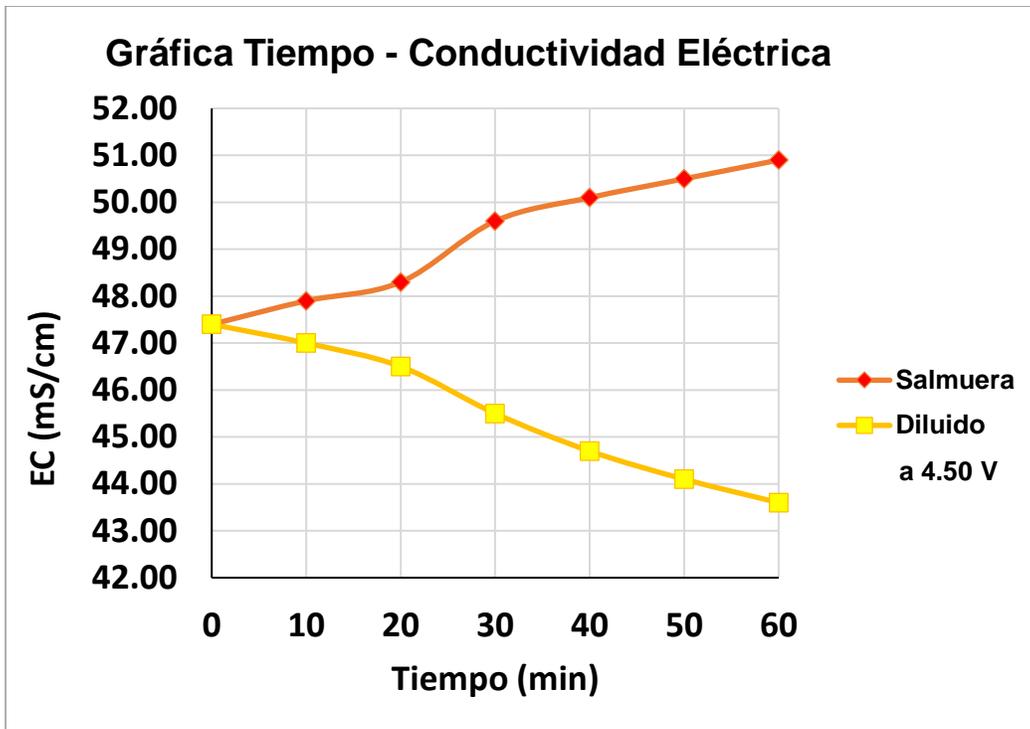


Figura 6.22 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 4.50 V.

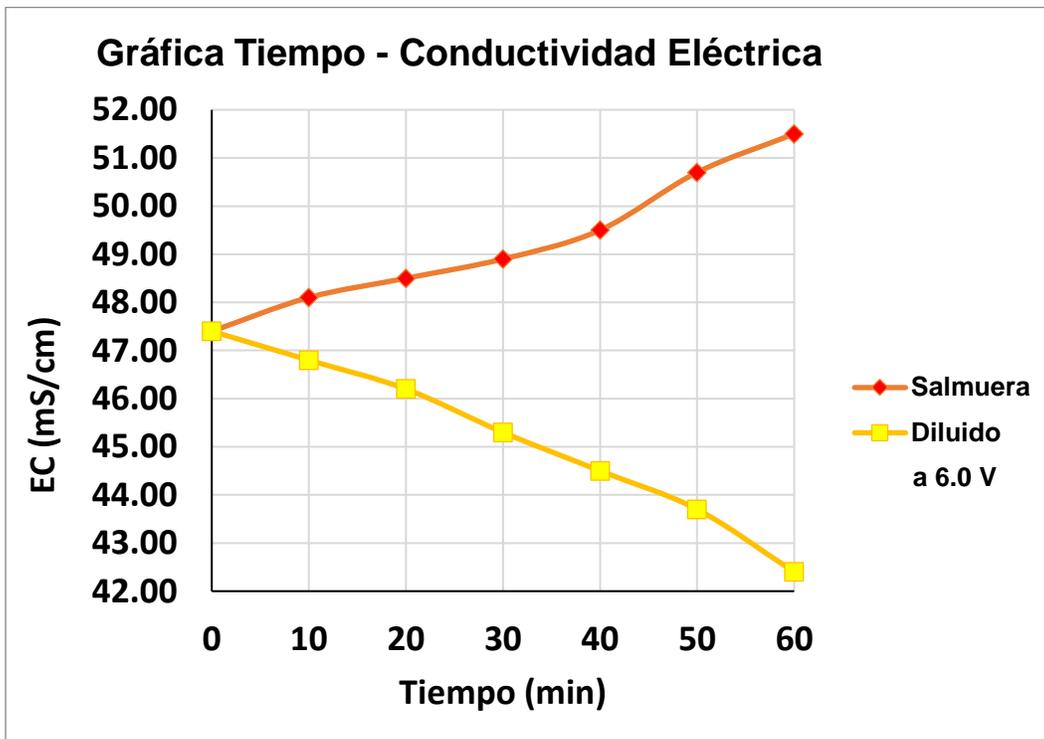


Figura 6.23 Gráfica Tiempo-Conductividad Eléctrica de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 6.0 V.

Se puede notar que el comportamiento de las gráficas es sumamente interesante, puesto que van cambiando los pares de curvas entre voltaje y voltaje. A una tensión eléctrica de 3.0 V se percibe ligeramente la variación en las mediciones en cada parámetro, a 4.5 V un poco más y a 6.0 V se observa aún más la diferencia entre los datos.

Para el caso de las lecturas de Salinidad, la representación gráfica tiene un comportamiento similar, puesto que la Conductividad y la Salinidad están íntimamente relacionadas, este dato importante tiene respuesta debido a que, al aumentar su concentración de iones de sal disueltos en el agua, la conductividad aumenta.

Para 3.0 V, las mediciones de Salinidad son notorias en decimales, pero no rebasa en ningún momento el entero. Se vuelve a ser énfasis que esto se debe a la polarización de los electrodos, la fuerza de atracción que provienen de los elementos de titanio siguió siendo pequeña y también tiene mucha influencia la concentración de sales que tiene el agua de mar, por esa razón logra un movimiento pequeño en los iones del líquido.

De acuerdo con la tabla 6.8 y contrastado con la figura 6.24, se compara el comportamiento del recipiente diluido y del concentrado (salmuera). Para el recipiente diluido, la diferencia de concentración en las mediciones es 0.21, 0.14, 0.28, 0.28, 0.14 y 0.14 ppt y para el concentrado es 0.63, 0.28, 0.42, 0.35, 0.07, y 0.21 ppt.

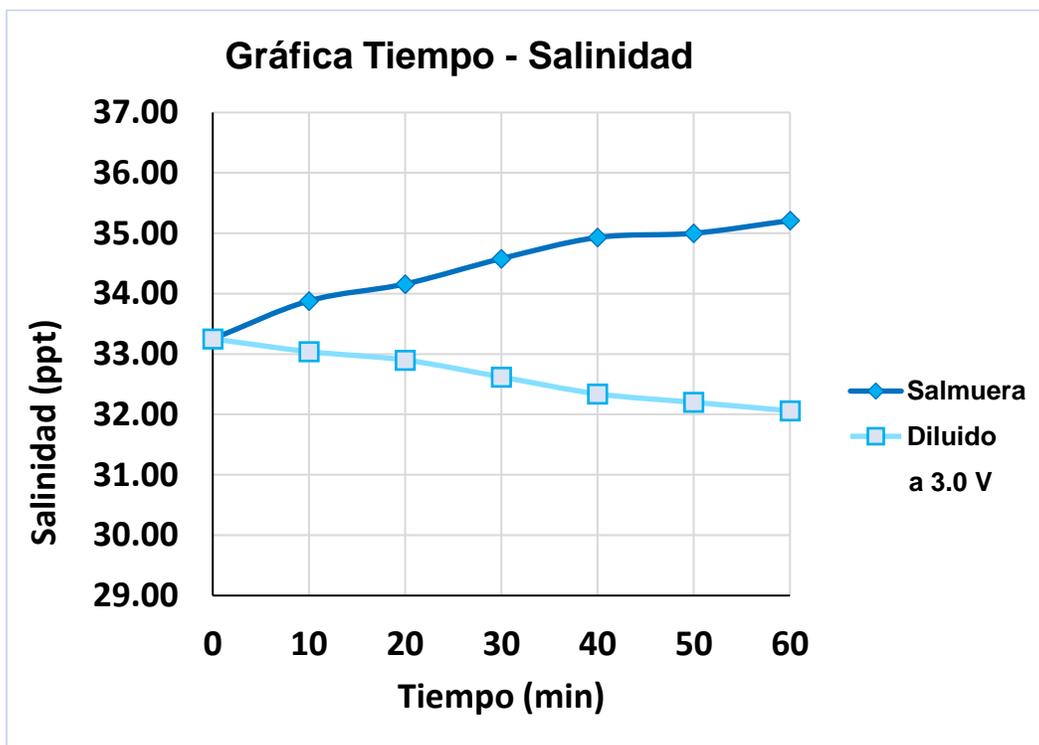


Figura 6.24 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 3.0 V.

Cuando se aumentó el voltaje a 4.50 la variación del diluido fue 0.28, 0.35, 0.70, 0.56, 0.42 y 0.35 ppt y para el concentrado de 0.35, 0.28, 0.91, 0.35, 0.28 y 0.28 ppt. En el primer caso se nota un comportamiento con más rango de desalación, sobre todo en las lecturas intermedias, a diferencia de la primera prueba a 3.0 V; y en el caso del concentrado, mantiene un promedio de datos similar. Lo anterior se visualiza en la figura 6.25.

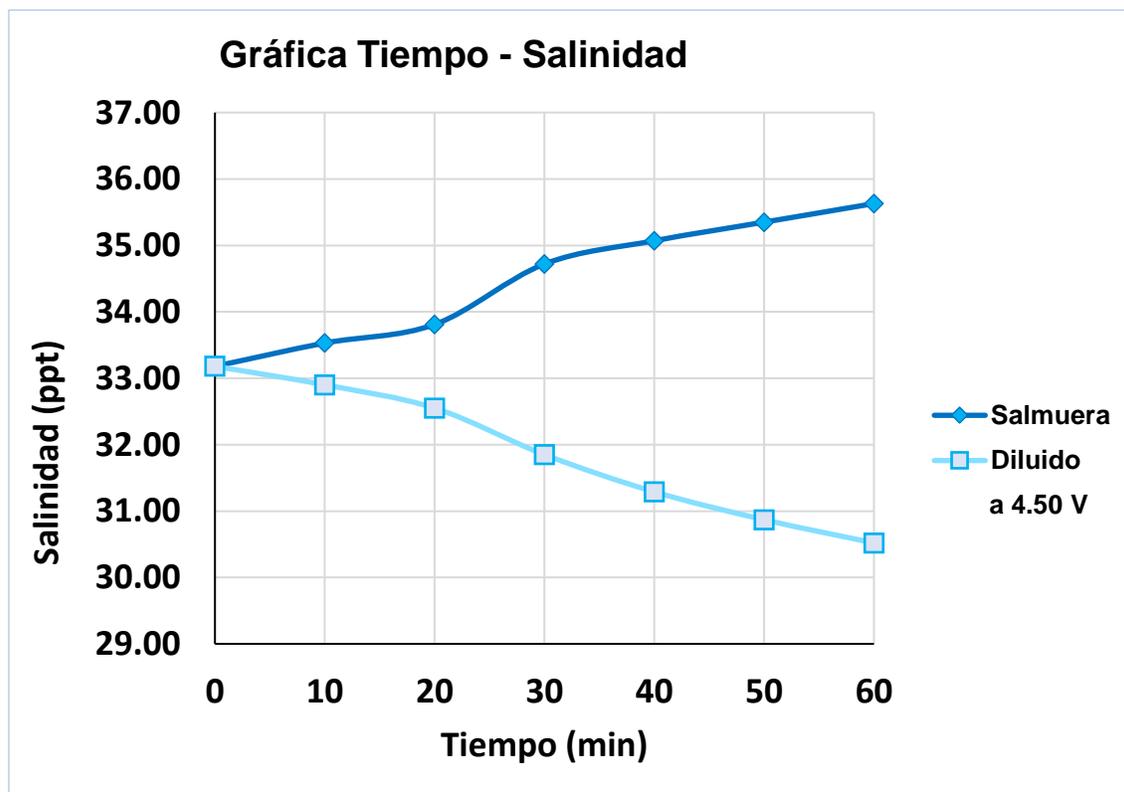


Figura 6.25 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 4.5 V.

Para una diferencia de potencial a 6.0 voltios, los cambios en la concentración del diluido fueron 0.42, 0.42, 0.63, 0.56, 0.56 y 0.91 ppt y para el concentrado de 0.49, 0.28, 0.28, 0.42, 0.84 y 0.56 ppt.

En la figura 6.26 se puede observar que para un voltaje de 6.0, el recipiente con agua diluida tiene un comportamiento mucho mejor en el proceso de eliminación de sales y una ganancia de iones un poco más alta en el concentrado, sin lugar a dudas es más favorable que en las pruebas a 3.0 V y 4.5 V.

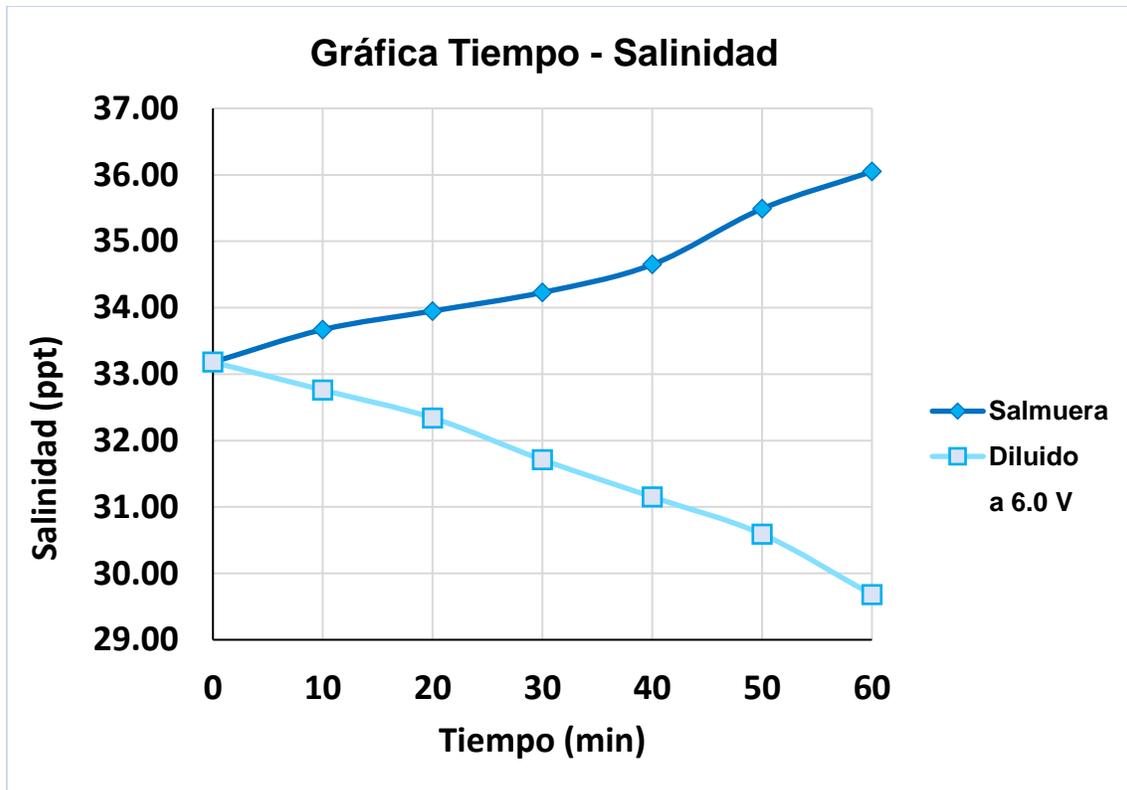


Figura 6.26 Gráfica Tiempo-Salinidad de agua diluida y agua concentrada (salmuera), a 6.0 V.

Para finalizar esta sección, se menciona que los resultados y representaciones gráficas anteriores, corresponden únicamente a la medición de 2 parámetros durante el experimento ya que el objetivo principal de este trabajo está enfocado en analizar las gráficas de Salinidad-Tiempo; debido a esto, los demás factores como Ph, ORP, TDS, SG y Temperatura, serán abordados en trabajos posteriores.

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

La verdadera sabiduría está en reconocer la propia ignorancia.

Sócrates

7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

7.1. Conclusiones

De acuerdo con lo desarrollado en este trabajo, se puede concluir que se demostró que la celda electrolítica, proporcionada por el Instituto de Ingeniería UNAM, realiza la desalación de agua marina con el método de Electrodiálisis, utilizando la tecnología de membranas; y se deja una buena motivación para seguir con el estudio de este tema, ya que tiene un impacto muy importante en el desarrollo para la obtención de agua dulce, que como ya se hizo mención, en los próximos años será de primordial importancia.

Algo muy interesante que ocurrió en el experimento debido a ciertas condiciones del agua marina es que, las lecturas no tienen un comportamiento lineal y por ende las gráficas poseen una apariencia curvilínea. Se nota que respecto a la concentración inicial de 33.25 g/L y 33.18 g/L y las demás concentraciones obtenidas en todo el tratamiento, incrementan y disminuyen poco en un principio; esto tiene obediencia a la composición química del agua y a la polarización de los electrodos con una diferencia de potencial baja; y el agua marina por su caso tiene muchos compuestos e iones (CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , entre otros) diferentes a Cloruro de sodio (NaCl); esta última mezcla de iones es la de mayor abundancia en el líquido.

Por otra parte, se comenta que también las variaciones de sal no son uniformes, esto es porque el electrolito estuvo interactuando con la solución de enjuague, para tener un equilibrio químico en todo el proceso.

Se afirma que, así como transcurre el tiempo de 1 hora para cada prueba, y el voltaje aumenta de 3.0, 4.5 y 6.0 de igual manera para cada ensayo, los puntos leídos en el recipiente de agua concentrada (salmuera) van incrementando y en el recipiente de agua diluida van disminuyendo.

Para un voltaje de 3.0 y un tiempo total de 60 minutos, el recipiente concentrado presenta un incremento en la salinidad de 1.96 g/L y en el diluido una diferencia de 1.19 g/L. Cuando se intensifica la tensión a 4.5 V, el concentrado hace notar un aumento de 2.45 g/L y el diluido una reducción de 2.66 g/L. Para la última diferencia de potencial aplicada a 6.0 V, el recipiente que va aumentado su concentración presenta un crecimiento de 2.87 g/L y el recipiente que disminuye su salinidad muestra una pérdida de 3.5 g/L. De lo anterior, se determina que el factor importante para desalar la muestra de agua es el voltaje aplicado.

De esta manera se puede concluir que la celda electrolítica construida en el Instituto de Ingeniería de la UNAM cumple con el objetivo particular que fue demostrar la desalación de agua de mar por la técnica de Electrodiálisis.

Finalmente se destaca que, es la primera vez que se realiza un tratamiento por el método de Electrodiálisis, usando una muestra de agua marina de un lugar en específico, en este caso fue de la Costa de Oaxaca.

7.2. Futuras líneas de trabajo

Esta investigación deja mucho que hacer el área de Ingeniería Hidráulica, especialmente enfocado en el mar y focalizándolo en la desalación de agua. Las líneas de trabajo posteriores pueden ser:

- La estimación de la salinidad de diferentes muestras de agua marina, de otros sitios de interés, utilizando la técnica de Electrodiálisis.
- La optimización de operación de la celda electrolítica, para una mayor eficiencia en desalar agua a un bajo consumo de energía.
- Una comparación de otros métodos de desalinización a una escala de laboratorio.
- Un estudio de análisis químico de la composición del agua, antes de someterla al proceso de desalación y después de la prueba.
- La comparación de agua desalada como producto final con agua potable apta para consumo humano y sus beneficios o sus daños a la salud.

BIBLIOGRAFÍA

- (Aedyr), a. E. (16 de enero de 2020). *¿qué es una membrana? ¿en qué consiste la tecnología de membranas para el tratamiento de agua?* . Obtenido de: <https://aedyr.com/que-es-membrana-consiste-tecnologia-membranas-tratamiento-agua/>
- 2023, A. E. (s.f.). Desalación por ósmosis inversa, el mar como fuente de esperanza. Obtenido de: https://experience.acciona.com/es/agua/desalacion-osmosis-inversa-mar-fuente-esperanza/?_adin=02021864894.
- A, j. O. (2018). Pure co2 electrolysis over an ni/ysz cathode in a solid oxide electrolysis cell. *The royal society of chemistry* , 7.
- A. Campione, I. G. (2018). Electrodesalination for water desalination: a critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Elsevier b.v.*
- A. Campione, a. C. (2019). A hierarchical model for novel schemes of electrodesalination. *Elsevier b.v.*, 79–93.
- A. Campione, a. C. (2020). Water desalination by capacitive electrodesalination: experiments and modelling. *Elsevier desalination* 473.
- A.h. Galama, m. S. (2013). Seawater predesalination with electrodesalination. *Elsevier b.v.*
- Aamer ali, r. A. (2018). Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. *Elsevier*, 1–21.
- Acciona. (29 de octubre de 2019). ¿qué es la ósmosis inversa? Obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?V=7s0h984uody>.
- Adc media ediciones tecnicas, s. (2016). *Retema, revista técnica de medio ambiente*. Obtenido de: <https://www.retema.es/noticia/sadyt-finaliza-la-desaladora-de-ashdod-en-israel-hg4gy>.
- Aqua, p. (2022). *Osmosis inversa & sistemas de tratamiento de agua*. Obtenido de: <https://es.pureaqua.com/sistemas-de-nanofiltracion-nf/>.
- Aquae. (2022). *Las plantas desalinizadoras más grandes del mundo*. Obtenido de: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/desalinizacion-en-el-mundo/>.
- Arema. (2022). *Piloto edr:la planta compacta de electrodiálisis reversible (edr) que arema ha desarrollado*. Obtenido de: <https://arema.com/piloto-edr/>.

- Becerril, f. M. (2014). *"low-capacity reverse osmosis solar desalination plant,"*.
Obtenido de:
[Http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s1692-33242019000200069](http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s1692-33242019000200069)
- Berk, Z. (2009). Food Process Engineering and Technology. Food Science and Technology, 233-257.
- Bibliography mariagiorgia la cervaa, I. G. (2018). Determination of limiting current density and current efficiency in electro dialysis units. *Elsevier*, 138–148.
- Bibliography reiichi yamane, m. I. (s.f.). Concentrated brine production from sea water by electro dialysis using ion exchange membranes . Vol. 8.
- Camilo Castro-Jiménez, C. C.-J.-J.-M. (2019). State of the Art: Desalination Using Membrane Technologies as an Alternative for the Problem of Fresh Water Shortage. Revista Ingenierías Universidad de Medellín.
- Campione, I. G. (2018). Electro dialysis for water desalination: a critical assessment of recent developments on process fundamentals, models and applications. *Elsevier*, 121-160
- Carbotecnia. (26 de marzo de 2021.). *¿qué es la microfiltración?* Obtenido de:
<https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/filtracion-de-agua-liquidos/que-es-microfiltracion/>.
- Christian guizard, i. -u. (1999). *Tecnicas membranarias de filtracion de liquidos*. Obtenido de: <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/s451b.pdf>.
- Claudio, i. O. (octubre de 2018). *"desalinización de agua para aplicaciones de potabilización mediante el desarrollo de tecnología solar sustentable*. Obtenido de:
<https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/873/1/17450.pdf>.
- Concepto. (2023). *Filtración*. Obtenido de: <https://concepto.de/filtracion/>.suarez, d. S. (2006). *Conductividad eléctrica por el método electrométrico en aguas*. obtenido de:
<http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/conductividad+el%c3%a9ctrica.pdf/f25e2275-39b2-4381-8a35-97c23d7e8af4>.
- Corro, d. S. (2014). *Procedimientos para el control químico del sistema de tratamiento de la central nucleoeléctrica laguna verde por ósmosis inversa, universidad veracruzana*. Obtenido de:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s1692-33242019000200069.

Dévora isjordia, g. E., gonzález enríquez, r., & ponce fernández, n. E. (mayo-agosto, de 2012). *Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México*. Obtenido de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46123333006>.

Escobar, f. F. (marzo de 2006). *Estudio de la conductividad eléctrica de soluciones electrolíticas y su aplicación en la biofísica vegetal*. Obtenido de: <http://132.248.9.195/pd2006/0603980/0603980.pdf>

España, r. A. (2019 de noviembre de 2019). *Potencial redox de oxidación-reducción orp, para la bioseguridad de nuestras granjas*. Obtenido de: <https://avinews.com/potencial-redox-de-oxidacion-reduccion-orp-para-la-bioseguridad-de-nuestras-granjas/>.

Eugene s. Beh, m. B. (s.f.). A redox-shuttled electrochemical method for energy-efficient separation of salt from water. *Parc, a xerox company*,24.

Fabao luoa, . W. (2017). A power free electro dialysis (pfed) for desalination. *Elsevier*, 404, pág 138-146.

Filtros anoia, s. (s.f.). *Microfiltración*. Obtenido de: <http://www.ictsl.net/plaintext/downloads/filterlab2009microfiltracion.pdf>.

Freeman, A. S. (s.f.). *Fundamentals of Membranes for Water*. University of Texas at Austin, 17 .

García C.R. de J., H. R. (2015). Tecnologías de desalinización de agua. ERA SOLAR Edición América 2015, 6-16.

Gijs doornbusch, m. V. (2021). Multistage electro dialysis for desalination of natural seawater. *Elsevier desalination* 505.

Hong-joo lee, f. S.-h. (2002). Designing of an electro dialysis desalination plant. *Elsevier science b.v.*, 267-286.

Iagua. (2022). Idam de torrevieja: tecnología innovadora para la protección de membranas y la eficiencia energética. Obtenido de: <https://www.iagua.es/noticias/espana/acciona-agua/15/02/25/idam-torrevieja-tecnologia-innovadora-proteccion-membranas-y>.

Instruments, h. (2023). *Determinación de salinidad en agua de mar y pisciculturas*. Obtenido de: https://cdn.hannachile.com/hannacdn/marketing/capacitacion/2017/06/webinar_salinidad.pdf.

- Interempresas. (18 de abril de 2022). *Canales sectoriales*. Obtenido de: <https://www.interempresas.net/agua/articulos/386379-que-es-la-microfiltracion.html>
- J. Veerman, m. S. (2010). Reverse electrodialysis: evaluation of suitable electrode systems. *Springer*, 40:1461–1474.
- Korngold, e. (1982). Electrolysis unit: optimization and calculation of energy requirement. *Elsevier scientific publishing company*, 171-179.
- Laura j. Banasiak, t. W. (2007). Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration. *Elsevier b.v.*, 38–46.
- Lenntech. (2023). *Ed / edr - zero liquid discharge*. Obtenido de: <https://www.lenntech.es/processes/brine-treatment/conventional-brine-treatment/edr.htm>.
- López, j.-a. G. (2007). *Densidad relativa = specific gravity para instrumentistas y lingüistas*. Obtenido de: <http://www.tiemporeal.es/archivos/densidadrelativa.pdf>.
- Luigi gurreri, a. T. (2020). Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery: a systematic review on progress and perspectives . *Membranes*, 10, 146
- M. Turek, b. B. (2007). Renewable energy by reverse electrodialysis. *Desalination 205 elsevier b.v* , 67–74.
- Mar, i. D. (2021). *Una introducción a la oceanografía física*. Obtenido de: <http://www.physocean.icm.csic.es/introoc/lecture03-es.html>.
- Megavial infraestructuras, s. (2015 - 2023). Obtenido de: <https://www.megavial.es/desaladora-idam-torre vieja.html>.
- México, p. D. (2019). *Nanofiltración*. Obtenido de: <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/nanofiltracion>.
- Mohtada sadrzadeh, t. M. ((2008)). Sea water desalination using electrodialysis. *Elsevier*, 440–447.
- Mohtada sadrzadeh, t. M. (2009). Treatment of sea water using electrodialysis: current efficiency evaluation. *Elsevier b.v. Desalination 249* , 279–285.
- Nuevo, d. (25 de agosto de 2020). *Tecpa ingeniería y medio ambiente*. Obtenido de: <https://www.tecpa.es/las-3-desaladoras-mas-grandes-del-mundo/>

- O. Scialdone, a. A. (2013). Investigation of electrode material - redox couple systems for reverse electrodialysis processes. *Journal of electroanalytical chemistry* , 704 1-9.
- O. Scialdone, c. G. (2012). Investigation of electrode material – redox couple systems for reverse electrodialysis processes. Part i: iron redox couples. *Elsevier*, 66–75.
- P.m. Pierrard, p. P. (1970). Behaviour of an electrodialysis unit cell. *Desalination. Elsevier* , 285-296.
- Phillip, m. E. (2021). The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment. *Science vol 333*.
- Pilat, b. (2001). Practice of water desalination by electrodialysis. *Elsevier desalination* , 385-392.
- Potable, e. A. (19 de enero de 2019). *Desalación del agua* . Obtenido de: <http://www.elaguapotable.com/desalacion.htm>
- Qing chen, y.-y. L.-l.-m. (2015). Desalination energy self-sufficient desalination stack as a potential fresh water supply on small islands. *Elsevier*, 359, 52-58 pág.
- Román, M. G. (2009-2010.Z). Tratamiento de Aguas Tratamiento de Aguas. . Dpto. de Ingeniería Química, F. d. (s.f.). . Obtenido de: <https://www.ugr.es/~mgroman/archivos/tari/teari-2.pdf>
- S.a.s., f. Y. (2004). *Ultrafiltración: definición, características, ventajas y desventajas*. Obtenido de: <https://blog.fibrasnormasdecolombia.com/ultrafiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas/>.
- S.a.s., f. Y. (2023). *La nanofiltración: definición, características, ventajas y desventajas, aplicaciones y usos*. Obtenido de: <https://blog.fibrasnormasdecolombia.com/la-nanofiltracion-definicion-caracteristicas-ventajas-desventajas-aplicaciones->
- Sainz, g. D. (2017). *Modelado y simulación de un proceso de electrodiálisis con membranas bipolares suministrado con energía solar fotovoltaica*. Obtenido de: <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/10498/391473.pdf?Sequence=1>.
- Sajjad al-amshawee, m. Y. (2020). Electrodialysis desalination for water and wastewater: a review. *Elsevier b.v*.

- Scielo. (2013). *Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México*. obtenido de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?Script=sci_arttext&pid=s2007-24222013000300002 hyperlink
- Sonin, g. G. (1973). Membrane fouling in electrodialysis: a model and experiments. *Elsevier*, 107- 125.
- Soraya honarparvar, x. Z. (2019). Modeling technologies for desalination of brackish water — toward a sustainable water supply. *Elsevier* , 26:104–111.
- Sung-kook hong, c.-s. K.-s.-h.-k.-j.-s. (2016). Experimental and numerical studies on pressure drop in reverse electrodialysis: effect of unit cell configuration. *Springer*, 5287-5292.
- T.m. Mubita, s. P. (2022). Strategies to increase ion selectivity in electrodialysis. *Elsevier b.v. Separation and purification technology*.
- Technologies, i. (2018). *Proyecto sorek*. Obtenido de: https://www.ide-tech.com/es/our-projects/proyecto-sorek/?Data=item_1.
- Technologies., i. (2018). *Your water partners*. Obtenido de: <https://www.ide-tech.com/es/in-the-news/la-planta-de-desalinizacion-de-ide-en-ashkelon-israel-marca-un-record-mundial/>.
- Technology, w. (2022). *Planta desaladora de sorek*. Obtenido de: <https://www.water-technology.net/projects/sorek-desalination-plant/>.
- Tecnología, a. (s.f.). *Potencial redox?*. Obtenido de: http://acquatecnologiaperu.com/wpcontent/uploads/potencial_redox_acqua_tecnologia.pdf.
- Toraj mohammadi, a. K. (2003). Water shortage and seawater desalination by electrodialysis. *Elsevier desalination* 158, 267-270.
- Unusual, a. B. (2022). *Visita virtual a la idam de torrevieja* . Obtenido de: https://www.acciona.com/es/soluciones/agua/areas-actividad/desalacion/?_adin=02021864894.
- Utpba. (2018). *La escasez de agua, una preocupación mundial* obtenido de: <https://www.utpba.org/2018/04/04/la-escasez-de-agua-una-preocupacion-mundial/>
- Valdivieso, a. (2022). *lagua*. Obtenido de: <https://www.iaqua.es/respuestas/que-es-desalinizacion-agua>.

Valencia., u. P. (2011). *Desalación del agua* . Obtenido de:
<https://elaguaenelmundo.webcindario.com/desalacion.htm>.

Vidas, b. M. (mayo de 2021). *Desalinización: ¿el futuro del agua?* Obtenido de:
<https://blogs.iadb.org/agua/es/desalinizacion-el-futuro-del-agua/>.

Waterstation. (2021). *Ósmosis inversa: ventajas y desventajas*. Obtenido de:
<https://waterstation.mx/agua-y-salud/osmosis-inversa-ventajas-y-desventajas/>.

ANEXOS

ANEXOS

ANEXO A. FICHA TÉCNICA DE LAS MEMBRANAS.

ANEXO A.1 Características de las membranas

MEMBRANAS FUJIFILM TIPO 10		
Homogéneo	AEM	CEM
	Anión permselectivo	Catión permselectivo
Reforzamiento	Poliolefina	
Espesor seco (μm)	125	135
Resistencia eléctrica (1)	1.7	2.0
Selectividad permeable (2)	95	99
Capacidad IE (3)	1.8	1.5
Permeación de agua (4)	6.5	6.5
Resistencia a romperse (5)	2.8	2.8
Estabilidad del pH	pH 1-13	pH 1-13
Estabilidad de temperatura (6)	60	60
Aplicaciones típicas	Purificar agua, concentración de agua residual, agua mar, agua salobre, desalinización de alimentos.	
Tecnología típica	Electrodialisis Inversa (RED) y Electrodialisis (ED)	
(1) Resistencia eléctrica medida en (Ωcm^2) a 2 M NaCl		
(2) Permselectividad medida a 0.05-0.5 M de KCl		
(3) Capacidad de intercambio de ion (meq/g)		
(4) Permeación de agua (ml/bar.m ² .hr) a 0.1-0.7 M NaCl		
(5) Resistencia a romperse (kg/cm ²)		
(6) Temperatura (°C)		

ANEXO B. FICHA TÉCNICA DE LA BOMBA PERISTÁLTICA.

ANEXO B.1 Datos generales de la bomba peristáltica.

Modelo	Velocidad rpm	Diámetro (mm)	Flujo ml/min
323 S/D	3-400	4.8	6.66-880

ANEXO B.2 Características particulares de la bomba peristáltica.

Características	Accionamiento con cabezal de bomba 313D
Cabezal de bomba número de rodillos	3
Cabezal de bomba número de canales	1
Máxima tasa de flujo	2000 ml/min
Mínima tasa de flujo	0.06 ml/min
Máxima velocidad de operación	400 rpm
Mínima velocidad de operación	3 rpm
Rango de temperatura de funcionamiento	5 a 40 °C
Peso	4.7 kg
Humedad de la unidad	80 % hasta 31 °C, 88 °F, disminuyendo linealmente hasta 50 % a 40 °C, 104 °F
Ruido de conducción	<70dB(A) a 1m
Máxima altitud	2000 m
Fuente de alimentación de accionamiento	100-120V
Tamaño de orificio de tubería compatible	4.8 mm
Espesor de pared de tubería compatible	1.6 mm
Dimensiones	230x132 mm