



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA DESALACIÓN DE
AGUA DE MAR

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

PRESENTA:
ALBERTO RUIZ GARCÍA

TUTOR:
M. EN I. FELIPE MUÑOZ GUTIÉRREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. octubre 2018

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. VALDÉS PALACIOS JOSÉ ALBERTO

Secretario: M. EN I. SÁNCHEZ CIFUENTES AUGUSTO

Vocal: M. EN I. MUÑOZ GUTIÉRREZ FELIPE

1er. Suplente: DR. ROJAS MORIN ARMANDO

2do. Suplente: DR. GONZÁLEZ OROPEZA ROGELIO

Lugar donde se realizó la tesis:
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

M. EN I. FELIPE MUÑOZ GUTIÉRREZ

FIRMA

A mis padres, porque sin su apoyo, cariño y comprensión me hubiese sido imposible alcanzar esta meta. Quiero que sepan, que su amor es mi principal aliciente para esforzarme diariamente en ser una mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia, por todo el amor y el apoyo que me han brindado en todos los proyectos que he emprendido, y este caso no ha sido la excepción. Principalmente a mis padres que siempre han tenido para mí una sonrisa, un abrazo, un consejo y una palabra de aliento en los momentos precisos en que los he necesitado. La admiración y el amor que por ellos siento son infinitos.

A mi hermana le agradezco por ser mi amiga incondicional, mi cómplice y confidente en tantas aventuras, porque sé que es alguien con quien siempre puedo contar. A mis sobrinos Ángel y Antonio por la alegría que han traído a mi vida, por permitirme acompañarlos en su crecimiento y formación, lo cual me brinda la oportunidad de tratar de inculcarles el gusto por el conocimiento.

A Adri le quiero agradecer por todos los momentos vividos en estos años que hemos pasado juntos, por contrarrestar mi forma tan metódica de vivir y por siempre involucrarme en sus proyectos, personales y académicos, obligándome a investigar sobre diversos temas más allá de la ingeniería.

Muy especialmente quiero agradecer al M. I. Felipe Muñoz, por permitirme realizar este trabajo de tesis bajo su dirección, por darme la oportunidad de colaborar en algunos de sus proyectos y principalmente por compartir conmigo parte del conocimiento que ha adquirido a lo largo de una extensa vida profesional.

Por último, quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por todo lo que me ha brindado a lo largo de mi formación académica desde el nivel bachillerato y a través de su Facultad de Ingeniería, de la Unidad de Posgrado y de su Instituto de Ingeniería.

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis termodinámico realizado a los tres procesos más empleados para la desalación de agua de mar, con la finalidad de realizar una comparativa de sus eficiencias, ubicar las zonas del proceso en donde se destruye la mayor cantidad de exergía y proponer, en caso de ser factible, la implementación de algún tipo de energía renovable para la obtención del recurso energético que se requiere en cada proceso.

En el capítulo 1, se plantea la importancia de la desalación debido a la situación actual de escasez de agua apta para consumo humano que se vive en el mundo y de la cual nuestro país no se encuentra exento debido al elevado número de habitantes con los que se cuenta y a la mala distribución del recurso hídrico.

En los capítulos 2 y 3, se describen los principales procesos de desalación térmicos y de membrana: evaporación instantánea de múltiple efecto, evaporación de múltiple efecto, compresión de vapor, ósmosis inversa y electrodiálisis, para de este modo, poder conocer cuáles son las ventajas y desventajas que presenta cada proceso de desalación.

En el capítulo 4, se resumen las características de las fuentes renovables de energía; solar, eólica, geotérmica y biomasa, con base al tipo de energía (eléctrica o térmica) que se obtiene de estas fuentes es posible implementarlas en los diversos sistemas de desalación.

En el capítulo 5, se plantean las características del agua de mar, así como su composición y las principales problemáticas que presentan las sales que la componen al momento de someterse a los procesos de desalación.

En los capítulos 6, 7 y 8, se desarrollan los análisis termodinámicos de los procesos EIME, EME y OI, que son los métodos más empleados de desalación a nivel mundial y con la ayuda de la primera y segunda ley de la termodinámica se establecen los balances de masa, energía y exergía, para posteriormente conocer sus eficiencias.

El capítulo 9, muestra las conclusiones a las que se llegó y las recomendaciones que se proponen para la mejora de los procesos.

Índice

	Pág.
I. Introducción	1
Capítulo 1	
1. Importancia de la desalación	3
1.1. Situación mundial del agua dulce en la actualidad	3
1.2. El aumento en la población mundial y la creciente demanda de agua	9
1.3. El cambio climático y su impacto en los recursos hídricos	11
1.4. Repercusiones de la baja disponibilidad de agua en los ecosistemas	12
1.5. La desalación como herramienta para mitigar la escasez de agua dulce	13
1.6. Situación actual de México	14
Capítulo 2	
2. Procesos térmicos de desalación: evaporación súbita, evaporación múltiple efecto y compresión de vapor	16
2.1. Evaporación instantánea de múltiple efecto	16
2.2. Destilación por múltiple efecto	19
2.3. Compresión de vapor	22
Capítulo 3	
3. Procesos desaladores de membrana: ósmosis inversa y electrodiálisis	25
3.1. Ósmosis inversa	27
3.2. Electrodiálisis	34
3.2.1. Parámetros de diseño	39
3.2.2. Sistemas de electrodiálisis	41
3.2.3. Electrodiálisis continua	41
3.2.4. Limitaciones de los sistemas de electrodiálisis unidireccional	42
3.2.5. Electrodiálisis reversible	43
Capítulo 4	
4. Características de las energías renovables: solar, eólica, geotérmica y biomasa	46
4.1. Energía solar	46
4.1.1. Energía solar fotovoltaica	47
4.1.2. Energía solar térmica	49
4.2. Energía eólica	51
4.2.1. Aerogeneradores	53
4.3. Energía geotérmica	55
4.3.1. Obtención del recurso geotérmico	57

4.4.	Biomasa	60
4.4.1.	Fuentes de biomasa	61
4.4.2.	Procesos para la conversión de la biomasa en energía	62
4.4.2.1.	Procesos bioquímicos	63
4.4.2.2.	Procesos termoquímicos	64
Capítulo 5		
5.	Características del agua de mar	66
5.1.	Salinidad	66
5.2.	Composición iónica del agua de mar	70
5.3.	Temperatura	72
5.4.	Sólidos en suspensión	73
5.5.	pH	73
5.6.	Componentes microbiológicos	74
5.7.	Solubilidad de las sales	74
5.8.	Aumento del punto de ebullición en el agua de mar	77
Capítulo 6		
6.	Análisis termodinámico de una planta de EIME	79
6.1.	Descripción de la planta	82
6.2.	Resultados numéricos	83
Capítulo 7		
7.	Análisis termodinámico de una planta de EME	90
7.1.	Descripción de la planta	90
7.2.	Resultados numéricos	92
Capítulo 8		
8.	Análisis termodinámico de una planta de OI	97
8.1.	Descripción de la planta	97
8.2.	Resultados numéricos	98
Conclusiones		103
Referencias		106

Índice de figuras

	Pag.
Figura 1.1. Total de recuso hídrico renovable (m ³ per cápita por año) para el 2014.	4
Figura 1.2. Porcentaje de recursos hídricos renovables consumidos.	4
Figura 1.3. Promedio anual del estrés hídrico, relación entre el total anual de las captaciones del agua y el consumo total del suministro renovable disponible cada año.	5
Figura 1.4. Índice de frecuencia de la escasez de agua disponible para el uso por mes.	6
Figura 1.5. Mapa de la escasez física y económica del agua a nivel mundial.	7
Figura 1.6. Anomalías derivadas del almacenamiento de agua subterránea en milímetros por año (promediado para el periodo de referencia de 2003 a 2013).	8
Figura 1.7(a). Índices de riesgo de la calidad del agua de las principales cuencas fluviales durante el período de referencia (2000-2005).	9
Figura 1.7(b). Índices de riesgo de la calidad del agua de las principales cuencas fluviales pronosticados para el año 2050.	9
Figura 1.8. Demanda mundial de agua (captación de agua dulce): escenarios de referencia, 2000 y 2050.	11
Figura 2.1. Diagrama simplificado de una planta de evaporación instantánea múltiple efecto, configuración "once- through".	18
Figura 2.2. Diagrama simplificado de una planta de destilación por múltiple efecto.	20
Figura 2.3. Diagrama simplificado de una planta de destilación por compresión de vapor.	22
Figura 3.1. Esquema de los rangos de filtración de diferentes procesos de desalación mediante membrana.	26
Figura 3.2. Esquema de los procesos de ósmosis natural y ósmosis inversa.	27
Figura 3.3. Diagrama del proceso de filtración en un sistema de ósmosis inversa.	28
Figura 3.4. Diagrama simplificado del funcionamiento de una planta de ósmosis inversa	33
Figura 3.5. Esquema del efecto que genera una CC sobre una solución iónica.	34
Figura 3.6. Esquema de un conjunto de membranas Aniónicas (A) y Catiónicas (C) sin la aplicación de un potencial de CC (a) y con la aplicación del potencial (b).	35
Figura 3.7. Diagrama de flujo de un sistema de ED de bloques.	41
Figura 3.8. Diagrama de flujo de un sistema de ED unidireccional	42
Figura 3.9. Esquemas de los efectos que se generan al invertir la polaridad de los electrodos en una pila de membranas.	43
Figura 3.10. Diagrama de flujo de un sistema básico de EDR.	44
Figura 4.1. Esquema de las regiones semiconductoras de una celda solar y conducción eléctrica con luz incidente.	48
Figura 4.2. Diferentes tipos de concentradores solares.	50
Figura 4.3. Ejemplo de las curvas de rendimiento de distintos colectores solares.	51

Figura 4.4.	Capacidad mundial instalada de energía eólica-eléctrica y adiciones anuales en [GW] de 2006 a 2016.	52
Figura 4.5.	Principales componentes de un aerogenerador.	53
Figura 4.6.	Modelo de las estructuras internas de la Tierra.	55
Figura 4.7.	Ejemplos de: (a) Fumarolas, (b) Solfataras y (c) Géiser.	57
Figura 4.8.	Usos de la energía geotérmica.	59
Figura 4.9.	Potencial geotérmico instalado y sus adiciones, de los 10 países principales y resto del mundo, durante el 2016.	59
Figura 4.10.	Diagrama de una planta de generación eléctrica de ciclo binario.	60
Figura 4.11.	Ecuación química global de la fotosíntesis.	61
Figura 4.12.	Aprovechamiento de la biomasa.	62
Figura 4.13.	Esquema de la clasificación de la biomasa y sus respectivos procesos de conversión.	63
Figura 4.14.	Esquema de los procesos de conversión empleados para la biomasa húmeda.	64
Figura 4.15.	Esquema de los procesos termodinámicos de conversión de la biomasa.	65
Figura 5.1.	Salinidad superficial de los océanos medida desde el espacio por la NASA.	70
Figura 5.2.	Temperatura anual en la superficie del mar (°C).	72
Figura 5.3.	Gráfica de la Solubilidad de las sales en el agua de mar.	76
Figura 6.1.	Diagrama de la planta EIME, con las propiedades de los puntos analizados.	83
Figura 6.2.	Esquema del intercambiador de calor de la planta EIME.	84
Figura 6.3.	Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta EIME.	89
Figura 7.1.	Diagrama de la planta EME, con los flujos de agua y vapor que entrada y salen de la planta.	90
Figura 7.2.	Diagrama de la planta EME, con las propiedades de los puntos analizados.	91
Figura 7.3.	Esquema de la primera etapa de la planta EME.	93
Figura 7.4.	Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta EME.	96
Figura 8.1.	Diagrama de la planta OI, con las propiedades de los puntos analizados.	98
Figura 8.2.	Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta de OI.	102

Índice de tablas

	Pag.
Tabla 1.1. Ejemplos de la cantidad de agua que se emplea para la elaboración de diversos productos.	10
Tabla 1.2. Datos geográficos y socioeconómicos por entidad federativa para el 2015.	15
Tabla 3.1. Procesos de filtración y sus rangos de separación.	25
Tabla 3.2. Ejemplo de reporte de las lecturas de medición de una planta de electrodiálisis.	37
Tabla 4.1. Espectro y distribución de la radiación solar.	47
Tabla 4.2. Etapas del proceso de exploración geotérmica.	58
Tabla 5.1. Salinidad de las diferentes regiones del planeta según G. Forchhammer.	67
Tabla 5.2. Proporción de los principales iones del agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Fleming.	71
Tabla 5.3. Composición iónica del agua de mar en g/kg.	71
Tabla 5.4. Temperaturas máximas y mínimas de diferentes puntos geográficos.	73
Tabla 5.5. Solubilidades de algunas sales, en g sal/100 ml de agua a 30°C.	75
Tabla 5.6. Variación en la elevación del punto de ebullición del agua de mar en función de la temperatura y la salinidad.	78
Tabla 6.1. Propiedades de la planta EIME analizada.	83
Tabla 6.2. Resultados del análisis realizado a la planta EIME.	88
Tabla 7.1. Propiedades de la planta EME analizada.	92
Tabla 7.2. Resultados del análisis realizado a la planta EME.	96
Tabla 8.1. Propiedades de la planta de OI analizada.	96
Tabla 8.2. Resultados del análisis realizado a la planta de OI.	101

Nomenclatura

<i>A</i>	Coefficiente de transporte de la membrana.
<i>a</i>	Área de filtración de las membranas.
<i>APE</i>	Aumento en el punto de ebullición del agua de mar.
<i>C_a</i>	Concentración de sales en el caudal de alimentación.
<i>C_c</i>	Concentración de sales en el caudal del concentrado.
<i>C_f</i>	Factor de concentración.
<i>C_p</i>	Concentración de sales en el caudal del producto.
<i>C_s</i>	Concentración de la solución de alimentación.
<i>E</i>	Potencial del sistema eléctrico.
<i>e</i>	Rendimiento de la corriente.
<i>F*</i>	Constante de Faraday.
<i>f</i>	Fracción de exergía destruida.
<i>F_c</i>	Factor de conversión.
<i>F_d</i>	Flujo de agua desmineralizada en la pila.
<i>F_s</i>	Transporte de sales.
<i>GOR</i>	Razón de ganancia de salida.
<i>H</i>	Entalpía total.
<i>h</i>	Entalpía específica.
<i>I</i>	Corriente.
<i>i</i>	Factor de van't Hoff.
<i>IL</i>	Índice de Langelier.
<i>j</i>	Velocidad de filtración.
<i>K_e</i>	Constante ebulloscópica.
<i>K_s</i>	Coefficiente de transporte de sales.
<i>M_s</i>	Masa molar de la sal.
<i>M_w</i>	Masa molar del agua.
<i>m</i>	Molalidad.
<i>ṁ</i>	Gasto másico.
<i>mf_s</i>	Fracción de masa de la sal.
<i>mf_w</i>	Fracción de masa del agua.
<i>N</i>	Número de moles.
<i>n</i>	Número de efectos en las plantas EIME y EME.
<i>N*</i>	Número de pares de células.
<i>P</i>	Presión.
<i>P₀</i>	Presión del agua de mar entrante.
<i>P_a</i>	Presión de alimentación.
<i>P_{Dm}</i>	Pérdida de carga en las membranas.
<i>PNT</i>	Presión neta de trabajo.
<i>P_s</i>	Paso de sales.
<i>P_p</i>	Presión de permeado.
<i>Q̇</i>	Transferencia de calor.
<i>Q_a</i>	Caudal de alimentación.
<i>Q_c</i>	Caudal de concentrado.
<i>Q_p</i>	Caudal de producto.
<i>R</i>	Constante general de los gases.
<i>R*</i>	Resistencia del sistema.
<i>R_{am}</i>	Resistencia de la membrana aniónica.
<i>R_c</i>	Resistencia del concentrado.
<i>R_d</i>	Resistencia del desmineralizado.
<i>R_{cm}</i>	Resistencia de la membrana catiónica.
<i>R_{cp}</i>	Resistencia de un par de células.
<i>R_m</i>	Resistencia de la membrana.
<i>R_s</i>	Rechazo de sales, expresado en decimales.

R_u	Constante de gas universal.
S	Entropía total.
s	Entropía específica.
S_A	Salinidad absoluta.
SDT	Sólidos disueltos totales.
T	Temperatura.
T_0	Temperatura ambiente (del estado muerto).
T_e	Temperatura de ebullición de un disolvente puro.
V	Volumen.
v	Volumen de la solución en litros.
W_{min}	Trabajo mínimo (energía mínima de desalación).
\dot{X}	Flujo de exergía.
x_s	Fracción molar de la sal.
x_w	Fracción molar de agua.

Símbolos Griegos

α	Característica de la plasta de sólidos, que se aglomeran sobre el área de filtración de la membrana.
β	Factor de polarización.
ΔN	Cambio en la normalidad del flujo desmineralizado entre la salida y la entrada de las membranas.
ΔP	Diferencial de presión.
ΔT_e	Aumento del punto de ebullición.
$\Delta \dot{X}$	Incremento del flujo de exergía.
η_{II}	Eficiencia de segunda ley.
μ	Viscosidad dinámica de la solución de alimentación.
π	Presión osmótica.
Σm_i	Concentración molar de la disolución.
ψ	Flujo de exergía.

INTRODUCCIÓN

En México, como en el resto del mundo, el desabasto de agua apta para consumo humano es una problemática que se acrecienta diariamente. La distribución naturalmente inequitativa de este vital líquido, así como el crecimiento desmesurado de la población agudizan la problemática obligando a las naciones a implementar medidas de manera inmediata para subsanar y asegurar la mitigación del problema a corto y largo plazo.

Para el año 2015 nuestro país contaba con 446,777 millones de metros cúbicos de agua renovable y aunque el promedio anual por persona es de 3,692 m³ existen cinco estados en los que la escasez de agua es crónica, por debajo de los 1,000 m³ per cápita al año, y en otros tres estados el promedio anual de agua renovable por persona es inferior a los 500 m³ (CONAGUA, 2016), tal es el caso de la Ciudad y el Estado de México, en donde es necesario llevar agua de otras entidades para poder cubrir la gran demanda que ahí se genera.

En sitios donde no es posible llevar el agua, por los medios comunes, es necesario implementar métodos de purificación que permitan hacer uso de las fuentes naturales de agua con las que se cuente in situ. Considerando que en México existen 150 municipios con acceso directo al mar, y que en muchos de ellos el abastecimiento de agua potable es nulo o insuficiente, resulta viable considerar las tecnologías de desalación de agua de mar como una opción para la obtención de éste recurso.

La desalación consiste en separar el agua dulce de las sales disueltas que contiene el agua de mar o salobre. Existen diversos procesos de desalación, los cuales pueden ser clasificados como térmicos o de membrana, dependiendo de la tecnología que emplean, todos ellos presentan diferentes ventajas y desventajas que deben de ser analizadas puntualmente al momento de planificar la instalación de una planta de desalación.

Se estima que en el mundo hay un aproximado de 19,400 plantas de desalación en operación, las tecnologías más empleadas para la desalación de agua de mar son: la ósmosis inversa (OI) con 60% el total de las plantas instaladas a nivel mundial, la evaporación instantánea de múltiple etapa (EIME), con 27% y la evaporación de múltiple efecto (EME) con 8% (IDA, 2018). Según la Comisión Nacional del Agua, en México existen alrededor de 450 plantas de desalación, siendo la Ósmosis Inversa el proceso más utilizado, del total de éstas el 31% no está en operación debido a los altos costos de mantenimiento, la falta de refacciones de importación y la de personal calificado para su funcionamiento.

Una opción viable, para cubrir la demanda energética de los procesos de desalación del agua de mar, son las energías renovables. Debido a que en muchas ocasiones las plantas de desalación son instaladas en regiones distantes de las zonas urbanas o a su alto consumo energético, que repercute en altos costos de operación, las energías renovables pueden jugar un papel muy importante en el futuro desarrollo de proyectos de desalación.

El análisis termodinámico nos brinda la oportunidad de cuantificar la eficiencia e identificar las posibles mejoras que se le pueden aplicar a los procesos de desalación. Aplicando la primera ley de la termodinámica se puede obtener los balances de masa y energía de cada uno de los procesos y con ayuda de la segunda ley de la termodinámica es posible realizar un balance exergético para determinar la eficiencia de los procesos, y de sus componentes, para poder determinar aquellos que son susceptibles de mejoras.

1. IMPORTANCIA DE LA DESALACIÓN

1.1. Situación mundial del agua dulce en la actualidad

En toda la superficie terrestre, el agua dulce se renueva y se distribuye tanto espacial como temporalmente gracias a un ciclo continuo de evaporación, precipitación, filtración y escurrimiento, comúnmente conocido como ciclo del agua. Aunque esta es la forma natural en la que el medio ambiente renueva su recurso hídrico, no garantiza una distribución equitativa de este vital líquido, lo cual propicia un desabasto del mismo.

La escasez de agua, también conocida como estrés hídrico, se puede medir y definir de diversas formas. El indicador más empleado para referirse al problema de la escasez de agua en una nación es el “Agua renovable per cápita al año”, considerando este valor se puede conocer en qué nivel de estrés hídrico se encuentra la nación. Cuando el suministro de agua renovable de un país se encuentra por debajo de los 1,700 m³ per cápita al año se considera que esa zona está bajo un estrés hídrico regular, pero si dichos suministros caen más allá de los 1,000 m³ per cápita al año se encuentra en una situación de escasez de agua crónica y cuando la cantidad de agua per cápita al año es menor a los 500 m³ se considera que se tiene una escasez absoluta (FAO, 2016), ver figura 1.1.

Según datos publicados en las “Estadísticas de Agua en México 2016”, que difunde anualmente la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), en el año 2015 México se encontraba en el lugar número 94 (de 200 países) en cantidad de agua renovable per cápita, con una disponibilidad para ese año de 3,692 m³ de agua por habitante. Si consideramos esta cifra, en nuestro país no sufre de un estrés hídrico, pero existen otros factores que se deben de considerar; el primero de ellos es que al igual que en el resto del mundo, en nuestro país no se tiene una distribución equitativa del recurso hídrico, de tal modo que es en el sur de la República Mexicana donde se concentra casi el 70% de la cantidad de agua renovable con la que cuenta la nación, aunado a esto se debe de considerar la rapidez con la que está disminuyendo la cantidad de agua per cápita, puesto que según datos de la misma CONAGUA en 2013 se disponía de 3982 m³ de agua para cada habitante del país. Es decir, que en tan solo dos años la cantidad de agua per

cápita se redujo en casi 300 m³, y aunque esta reducción obedece en parte tanto al mal manejo de aguas pluviales en las grandes ciudades como al desmesurado desperdicio del agua potable, también es necesario considerar el aumento en el número de habitantes y el hacinamiento en zonas en las que no se tiene un recurso hídrico idóneo para cubrir la demanda existente.

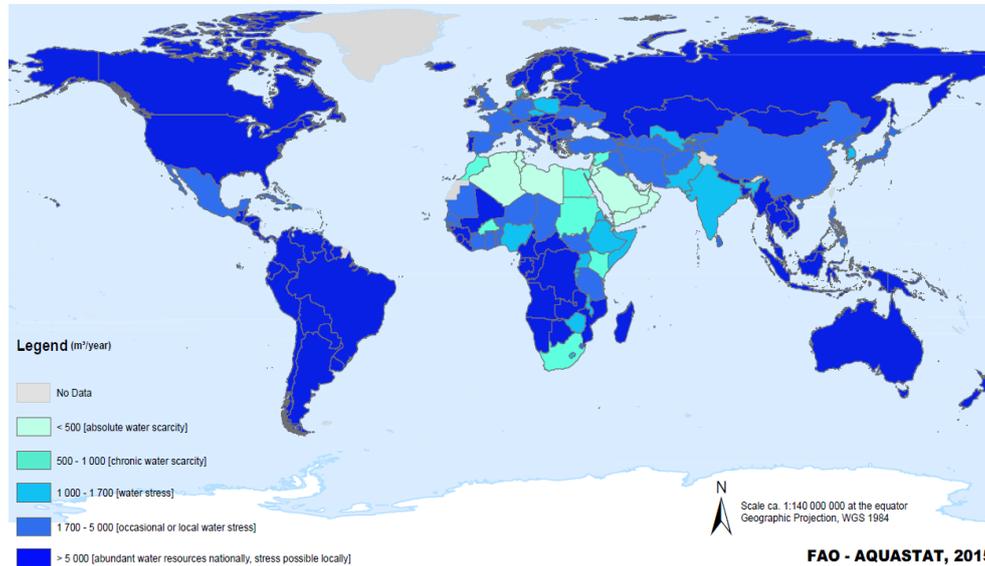


Figura 1.1. Total de recurso hídrico renovable (m³ per cápita por año) para el 2014.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

Aunque la forma de medir la escasez del agua mediante el concepto de agua renovable per cápita es una excelente herramienta para conocer el grado de estrés hídrico de una región, en ocasiones simplifica en demasía la problemática con el agua que se vive en ciertos países del mundo pues no considera algunos factores como lo son el acceso inequitativo al agua, ni la disponibilidad de soluciones locales para remediar dicha problemática, ver figura 1.2.

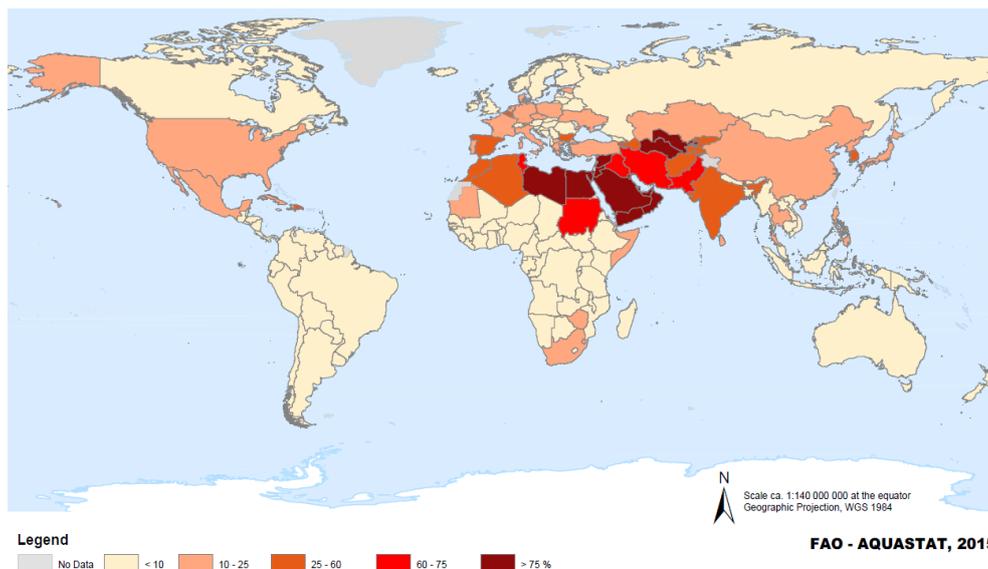


Figura 1.2. Porcentaje de recursos hídricos renovables consumidos.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

Para conocer mejor la relación entre la oferta y la demanda es necesario emplear un indicador diferente, para de este modo poder medir el nivel de presión humana sobre los recursos hídricos, todo esto basado en la relación que existe entre la sumatoria de la cantidad de agua que se emplean en las actividades humanas, es decir el agua que captan los asentamientos humanos, la industria y la agricultura, y compararla con la cantidad de aguas renovables con las que cuenta la región (FAO, 2016). Entre mayor sea la diferencia entre la cantidad de agua consumida por las actividades humanas en comparación con la disponibilidad de la misma, más difícil será cubrir la demanda y por tanto el estrés en el sistema de suministro se incrementará.

Los niveles de estrés hídrico pueden variar de gran manera dentro de un mismo país, especialmente en los países grandes, por tanto, es necesario realizar un estudio a nivel de cuenca para conocer con mayor precisión el problema de desabasto de una región, ver figura 1.3.

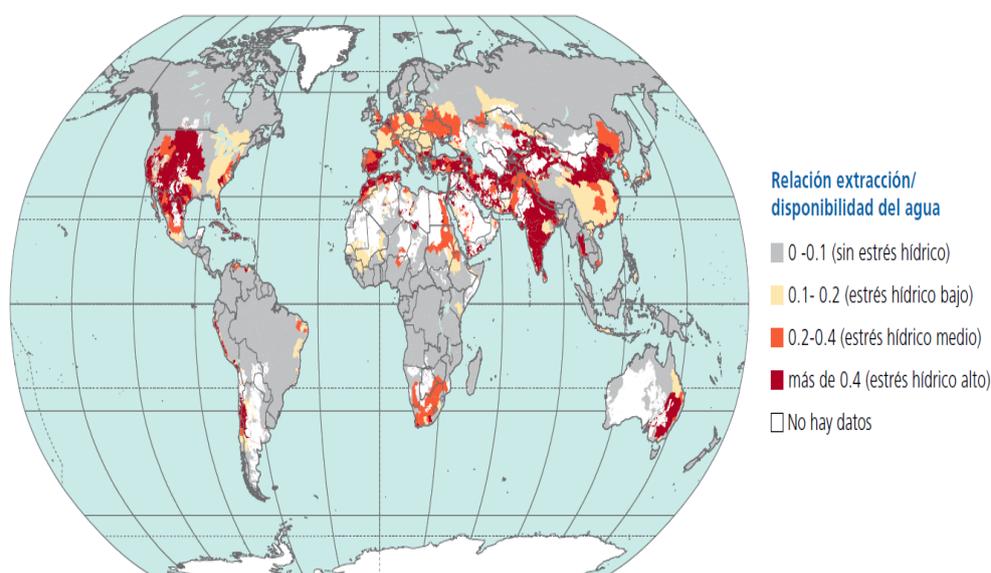


Figura 1.3. Promedio anual del estrés hídrico, relación entre el total anual de las captaciones del agua y el consumo total del suministro renovable disponible cada año.

Fuente WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

La disponibilidad de agua también varía significativamente con respecto al tiempo, es decir, a lo largo del año existen temporadas en las cuales puede llover de manera excesiva, moderada o inclusive puede pasar grandes periodos sin presentarse ninguna precipitación. Es por esta circunstancia que una misma región puede presentar cambios significativos en la cantidad de agua disponible generando una muy notoria variación estacional en la relación oferta-demanda en las temporadas de sequía y en las de lluvias. Al momento de realizar los promedios anuales de la disponibilidad del agua es necesario considerar la variación estacional para no encubrir la escasez que se tiene en las épocas de estiaje, dicha variación también se puede contrarrestar con buenos sistemas de almacenamiento de agua, creando de este modo un efecto amortiguador en las épocas donde la demanda supere la oferta de agua existente en ese periodo. La figura 1.4 muestra los resultados de la disponibilidad mensual de agua basados en las variaciones estacionales de la oferta y la demanda y considerando el efecto de amortiguación que ofrece el sistema de almacenamiento.

Como ya se ha descrito, la escasez de agua surge principalmente de dos factores; la variabilidad hidrológica y el uso desmesurado que el ser humano le da, y aunque esta problemática puede ser mitigada hasta cierto punto, con la infraestructura de almacenamiento, existen otros factores que en la actualidad deben de ser tomados en cuenta, uno de los principales es el cambio climático. El ciclo del agua está sumamente relacionado al clima, el cambio climático genera anualmente variaciones climatológicas que influyen en los patrones de precipitación y evaporación del agua lo cual repercute en la cantidad y en la frecuencia con la que se presentan las épocas de lluvias y sequías.

En la figura 1.4 se puede observar que en los cinco continentes se tienen riesgos importantes de escasez de agua estacional, pero es en el sur del continente asiático donde estos riesgos son más graves. Sin embargo, este mapa solo analiza las cuencas hidrográficas y no considera las zonas más áridas del mundo, como la Península Arábiga y el norte de África, por las cuales no atraviesa ningún río.

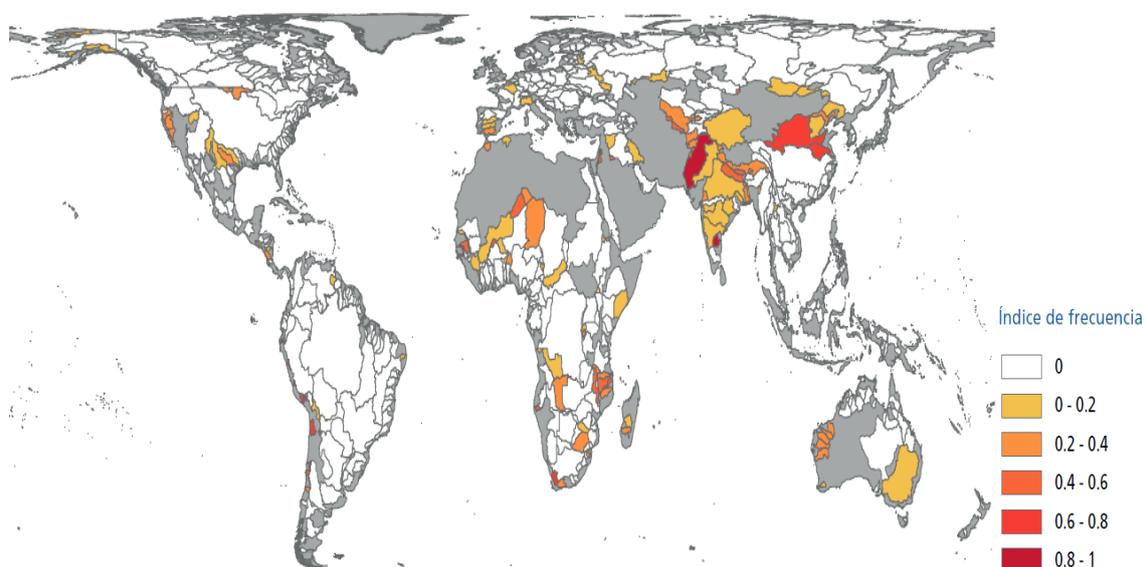


Figura 1.4. Índice de frecuencia de la escasez de agua disponible para el uso por mes.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) considera tres tipos de escasez de agua:

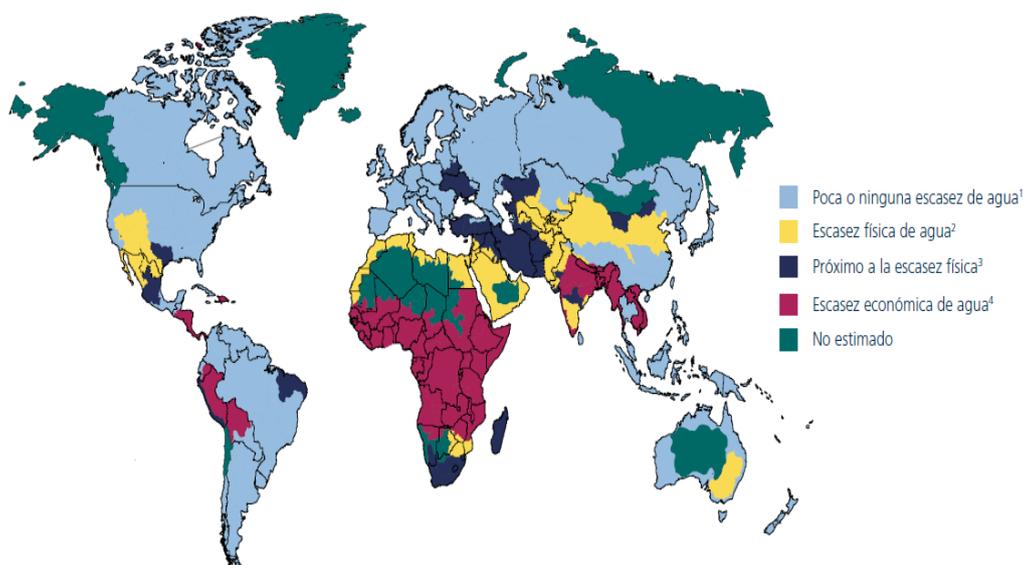
- Escasez de agua física; son los indicadores que se han descrito a lo largo de este capítulo los cuales miden el estrés y los bajos niveles de la cantidad de los recursos hídricos.

- Escasez de agua económica; ésta contempla la falta de infraestructura para la distribución y almacenamiento del agua, causada por la falta de recursos técnicos y económicos, y es independiente del nivel de los recursos hídricos.

- Escasez de agua institucional; ésta es generada por las instituciones gubernamentales al no brindar al usuario, ya sea por falta de interés o de recursos, un suministro de agua confiable,

seguro y equitativo. La figura 1.5 muestra la distribución mundial de la escasez de agua física y económica.

Para evitar que en diversas zonas del planeta se sufra de desabasto de agua debido a las largas temporadas de sequías, es necesario contar con buenos sistemas de almacenamiento, ya sean naturales o artificiales, para poder captar la mayor cantidad de agua que llega en las épocas de lluvias. De lo contrario, existirán zonas que en las épocas de estiaje presenten un alto grado de estrés hídrico. Es en este punto donde la escasez de agua económica y la escasez de agua institucional juegan un papel sumamente importante, debido a la falta de recursos para la construcción sistemas de almacenamiento (como lo son las presas, estanques, tanques, etc.) y de mano de obra calificada que van de la mano con el desinterés de muchos gobiernos por generar una legislación que promueva un uso y una repartición equitativa del recurso hídrico. Como se puede apreciar en la figura 1.5, las zonas del planeta donde se concentra la escasez de agua económica coinciden en gran medida con los países donde el índice de pobreza es elevado.



Notas:

1 Recurso hídrico abundante en relación al uso, con menos del 25% de agua de río extraída para fines humanos.

2 El desarrollo de recurso hídrico se encuentra próximo o ha excedido los límites sostenibles. Más del 75% de los caudales de ríos son extraídos para la agricultura, la industria y fines domésticos. Esta definición relaciona la disponibilidad con la demanda de agua e implica que las zonas áridas no necesariamente cuentan con escasa agua.

3 Más del 60% de los caudales de río son extraídos. Estas cuencas sufrirán escasez física de agua en un futuro próximo.

4 El capital humano, institucional y financiero limita el acceso al agua aun cuando el agua en la naturaleza está disponible a nivel local para satisfacer las necesidades humanas. Los recursos hídricos son abundantes en relación al uso del agua, con menos del 25% de agua extraída de ríos para fines humanos, sin embargo, aún existe desnutrición.

Figura 1.5. Mapa de la escasez física y económica del agua a nivel mundial.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

Las aguas subterráneas son una buena opción para poder contar con agua en las épocas de sequías, pero para ello la extracción de estas fuentes debe de ser de manera sostenible y sobre todo se debe de permitir la recarga de estos yacimientos en las épocas de lluvias. Desafortunadamente en la mayoría del planeta esto no se lleva a cabo, pues día a día se extrae mayor cantidad de agua de estos sitios sin permitir la recarga de los mismos. Los mantos acuíferos son abundantes a nivel mundial, pero se ha cuantificado que de los 37 acuíferos más grandes del mundo 21 de ellos están severamente sobre explotados, ver figura 1.6.

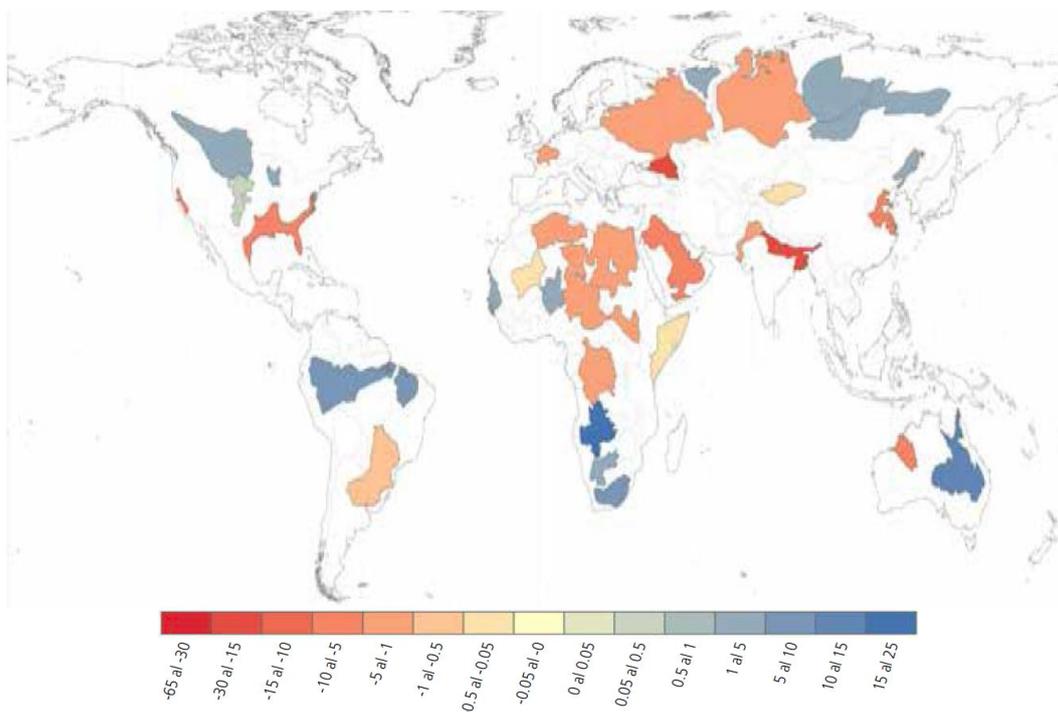


Figura 1.6. Anomalías derivadas del almacenamiento de agua subterránea en milímetros por año (promediado para el periodo de referencia de 2003 a 2013). Datos obtenidos de los satélites del experimento de la NASA GRACE de Recuperación de la Gravedad y Clima.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

Otro factor a considerar en la disponibilidad del agua es la mala calidad que ésta tiene, puesto que no puede ser utilizada para consumo humano u otros usos que requieren cierta pureza en el agua y el costo económico del tratamiento que se le tiene que dar para su purificación resulta sumamente elevado, al grado de imposibilitar su implementación y generando así escasez económica del agua. La actividad agrícola, industrial, minera, así como las aguas residuales y el mal manejo que se tiene de las corrientes pluviales en las zonas urbanas, generan una gran cantidad de contaminación en los recursos hídricos. Es por ello que se espera que en las próximas décadas la calidad del agua se deteriore con gran velocidad, lo que acrecentará el riesgo en la salud de la población, disminuirá el desarrollo económico y pondrá en peligro la vida de los ecosistemas (Peña, 2016). En las figuras 1.7(a) y 1.7(b) se muestran los índices en la calidad del agua de las principales cuencas pluviales registrados entre el año 2000 a 2005 y los índices esperados para el año 2050, como se puede apreciar en ambos mapas, se tiene una mayor exposición a los contaminantes, y se prevé un considerable incremento, en los países de ingresos bajos y medio bajos, esto debido a que cuentan con un mayor número de habitantes y a su crecimiento económico, especialmente en el países del continente africano y en el sur de Asia, pero los pronósticos para nuestro país no son alentadores puesto que en toda el área donde se cuenta con datos para la realización de la proyección se espera que para el año 2050 se tenga un riesgo elevado en la calidad del agua.

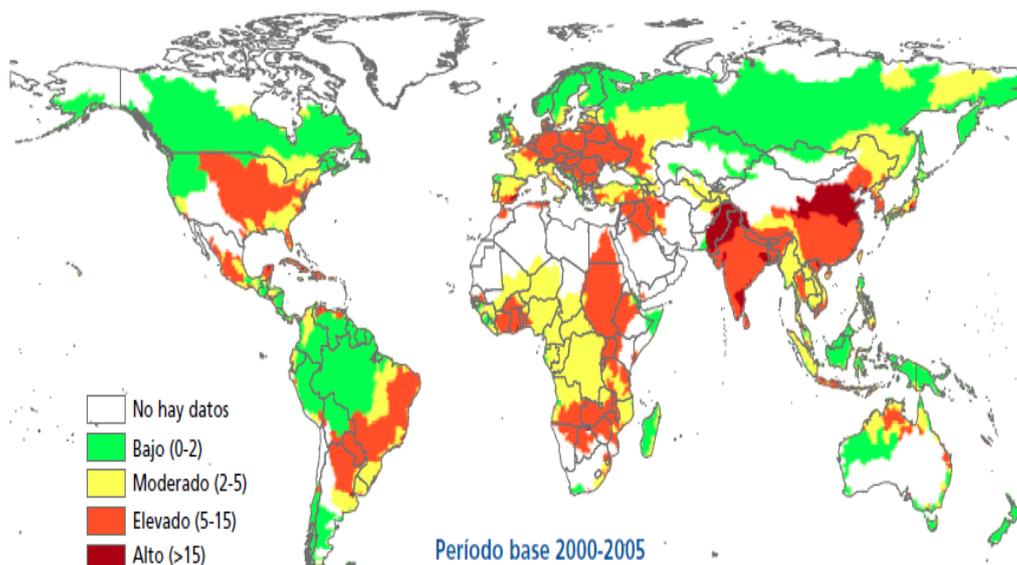


Figura 1.7(a). Índices de riesgo de la calidad del agua de las principales cuencas fluviales durante el período de referencia (2000-2005).

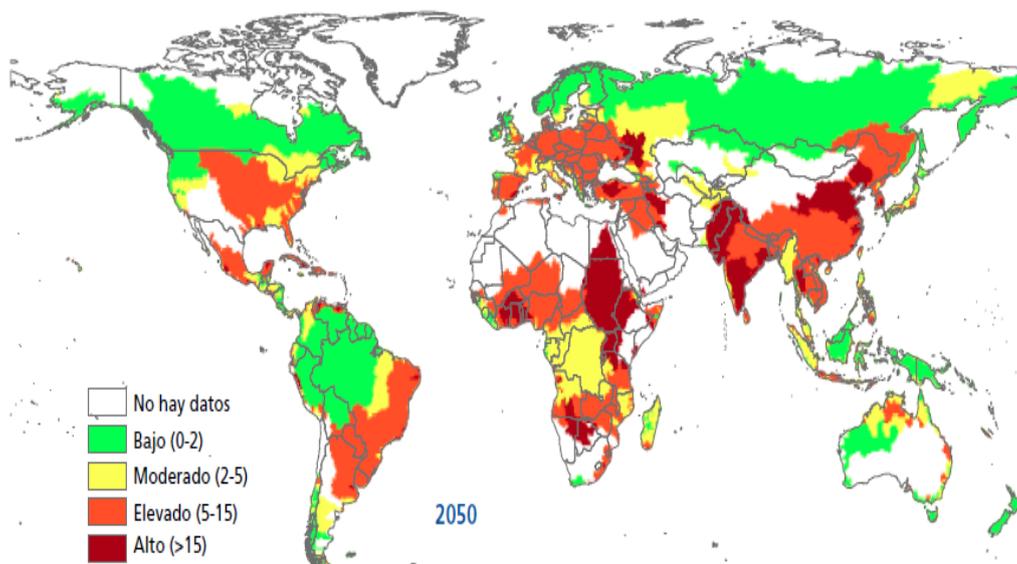


Figura 1.7(b). Índices de riesgo de la calidad del agua de las principales cuencas fluviales pronosticados para el año 2050.
Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

1.2. El aumento en la población mundial y la creciente demanda de agua

El aumento de la población implica un aumento en la demanda de los recursos hídricos. En los últimos años, la población está creciendo a un ritmo aproximado de 80 millones de personas al año para finales del año 2015 se estimó que se tenían 7,350 millones de habitantes en todo el planeta y se espera que esta cantidad crecerá en un 33% para el año 2050, es decir, que para el 2050 la cantidad de habitantes en el planeta será de 9,300 millones, trayendo consigo un aumento del 60% en la demanda de alimentos en el mismo período (FAO, 2016). Un dato muy importante a considerar es que también se prevé que el porcentaje de la concentración de

habitantes en las áreas urbanas pase de un 50% a casi un 68%, lo que implica que 6,300 millones de personas vivan en un área urbana en el año 2050, generando con ello un mayor estrés hídrico de esas zonas.

Al aumentar la población, también aumenta la necesidad de generar más alimentos, más bienes, más servicios y más energía eléctrica lo que conlleva a un mayor uso de agua en el sector agrícola, industrial y energético. La tabla 1.1 muestra ejemplos de la cantidad de agua que se emplea para la elaboración de diversos productos.

Tabla 1.1.
Ejemplos de la cantidad de agua que se emplea para la elaboración de diversos productos.

Producto	Agua usada para la producción (litros)
4 neumáticos	760,000
Metal para un coche	450,000
1 kg de carne de res	15,415
1 kg de algodón	10,000
1 kg de azúcar	8,000
1 kg de arroz	4,500
1 kg de mantequilla	4,000
1 kg de carne de pollo	3,920
1 camiseta de algodón	2,700
1 kg de papel	2,000
1 kg de trigo	1,500
1 kg de maíz	1,222
1 huevo	1,000
1 botella de agua mineral	1,000
1 gramo de oro	230
1 pan (800 g)	220
1 litro de leche	140
1 kg de fresas	140
1 taza de café	140
1 copa de vino	120
1 naranja	50
1 papa	25
1 kg de pepinos	15
1 tomate	13
1 litro de cerveza	10-16

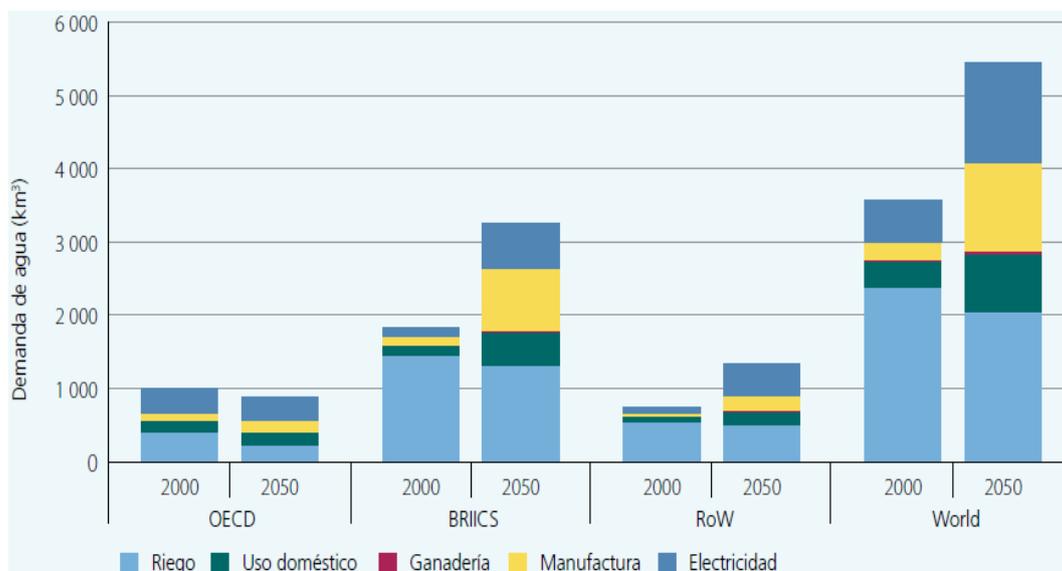
Fuente: <http://aguasindustriales.es/category/aguas-industria-agroalimentaria/page/2/>.

Actualmente se estima que, a nivel mundial, aproximadamente 663 millones de personas carecen de acceso inmediato a una fuente de agua potable, mientras que al menos 1,800 millones de personas ingieren un agua que no es considerada segura para el consumo humano y tan solo dos terceras partes de la población tienen acceso a sistemas de mejoramiento del agua (Willaarts, 2014).

La captación total de agua dulce a nivel mundial se distribuye de la siguiente manera: la agricultura consume generalmente un 70%, en los países menos desarrollados este porcentaje puede ascender hasta 90%, el sector energético consume aproximadamente 15% mientras que

el industrial consume 5%, el 10% restante es empleado para fines domésticos como lo son; el saneamiento, la higiene y el agua potable (FAO, 2016).

Si no se implementan medidas eficientes en el uso y tratamiento del agua, la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OCDE) prevé que para el año 2050 un 40% de la población viva en zonas con estrés hídrico severo y que la demanda mundial de agua aumente en un 50%. Sin embargo, existen estudios que pronostican un panorama más alarmante al considerar que será en el año 2030 cuando ya se tenga un déficit mundial del agua del 40%.



Notas:

OECD → Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.

BRICS → Brasil; Rusia, India, Indonesia, China y Sud África.

RoW → Resto del Mundo

Figura 1.8. Demanda mundial de agua (captación de agua dulce): escenarios de referencia, 2000 y 2050.

Fuente: WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo.

1.3. El cambio climático y su impacto en los recursos hídricos

El cambio climático representa una gran amenaza para la disponibilidad del agua, debido a que modifica la frecuencia y la intensidad de las épocas de lluvias y sequías, también promueve la generación de fenómenos meteorológicos extremos. Como es bien sabido el cambio climático propicia el incremento de la temperatura del planeta y ante este escenario, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estima que, por cada grado de aumento de la temperatura del planeta, se reducirán al menos en un 20% los recursos hídricos para aproximadamente el 7% de la población mundial.

Entre las regiones que se considera que serán más afectadas con la creciente escasez del agua se encuentran China, Australia Occidental, África Subsahariana, el Mediterráneo y partes de América del Sur.

El cambio climático aumenta el riesgo de grandes inundaciones y los costos que éstas generan son muy elevados, tan solo en el año 2013 se invirtieron 50,000 millones de dólares en la reparación de los daños causados por las inundaciones a nivel mundial.

Es preciso llevar a cabo acciones e implementar mecanismos que reduzcan el riesgo e impacto de los desastres naturales, específicamente en el caso de las inundaciones y de las sequías extremas, para que de este modo se pueda tener un mejor control sobre la disponibilidad del agua evitando que dichos desastres influyan de sobre manera en el estrés hídrico de las zonas afectadas.

1.4. Repercusiones de la baja disponibilidad de agua en los ecosistemas

La falta de agua no afecta únicamente a la actividad y desarrollo de la humanidad. Los ecosistemas también dependen de la cantidad de agua que reciben para poder llevar a cabo sus procesos naturales de captación y recuperación de los acuíferos y las diversas tareas que realizan todos los seres vivos que comparten el ecosistema junto a los seres humanos. El igual que la que es consumida por el ser humano, el agua que ocupan los ecosistemas tiene que tener una cierta calidad, puesto que, aunque la naturaleza ha desarrollado sus propios métodos de purificación del agua, existen sustancias que no puede filtrar, las cuales generan un deterioro en el ecosistema al grado de llegar a acabar con la vida de ciertas especies de animales.

La contaminación del agua se ha acrecentado en las últimas tres décadas, los mares, lagos, manantiales y ríos se han visto seriamente afectados por la falta de respeto por el medio ambiente que se ha presentado durante al menos los últimos 50 años. La humanidad no ha tenido reparos en verter aguas residuales no tratadas a las corrientes de aguas dulces o a en propiciar la erosión de grandes extensiones de terreno anteponiendo en todo momento sus beneficios a los daños que sus actividades pueden causar al ecosistema que los rodea.

En el año 2010 se calculó que la contaminación orgánica grave, afectó severamente a los ríos de Asia con porcentajes de entre un 11% a un 17%, seguido de los ríos de África con un porcentaje de contaminación de entre un 7% y un 15% y en menor medida a los ríos de América latina con una afectación de entre un 6% y un 10% (UN-Water, 2014).

La mala calidad del agua en los ecosistemas repercute no solamente en la falta de agua potable, también repercute directamente en las actividades económicas de la región, por ejemplo; los habitantes de zonas rurales que dependen del pescado de agua dulce para cubrir sus necesidades alimentarias o los que obtienen ingresos mediante el ecoturismo, que disminuye conforme aumenta la contaminación del ecosistema.

Junto con la escasez, la contaminación del agua es una problemática que se acrecienta día a día principalmente en África, Asia y América Latina, por lo tanto, es preciso realizar acciones para contrarrestar las afectaciones que se le están generando a la salud del ecosistema. Todas las acciones que tengan como finalidad la prevención del deterioro de las cuencas hidrográficas, se

pueden considerar como una inversión a mediano y largo plazo, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) considera que por cada dólar que se invierte en la preservación de dichas cuencas, se puede ahorrar entre 7.5 y 200 dólares en el costo de la instalación de nuevas plantas de tratamiento y filtración de agua (FAO, 2015).

El cuidado de los ecosistemas forma parte de los desafíos del crecimiento sostenible y se debe de legislar en ese sentido para asegurar la conservación y la restauración, de ser el caso, mediante sanciones o estímulos que fomenten el interés general por el cuidado del medio ambiente, una buena herramienta para ello sería el pago por servicios ambientales.

1.5. La desalación como herramienta para mitigar la escasez de agua dulce

Considerando todo lo expuesto a lo largo de este capítulo, se debe de considerar seriamente la grave problemática que se está presentando en diversas zonas del planeta con lo referente a la escasez del agua dulce y que esta problemática aumentara de manera muy considerable en las próximas décadas. Conforme los efectos del cambio climático crezcan acompañados del aumento de la población en todo el mundo, la necesidad de obtener agua apta para consumo humano será el principal reto de la humanidad. Es entonces que se debe de considerar métodos eficaces que puedan cubrir la demanda de agua dulce.

El mayor reto radicará en garantizar que las decisiones tomadas con relación al suministro de agua apta para consumo y las actividades humanas sean compatibles de igual manera con el bienestar de los ecosistemas y con los derechos humanos.

Aproximadamente el 97.5% del agua con la que cuenta el planeta es agua salda (CONAGUA, 2015), misma que mediante los procesos adecuados de desalación puede ser empleada para las actividades humanas.

El consumo de agua que no cumpla con los requerimientos indispensables para el consumo humano genera una gran cantidad de muertes, principalmente en los sectores más vulnerables de la población, como lo son los niños, los ancianos y las personas enfermas. Se estima que cada veinte segundos muere un infante a causa de la insuficiente infraestructura de saneamiento del agua (UN-Water, 2014).

La inseguridad hídrica le genera un costo total a la economía mundial de aproximadamente 500,000 millones de dólares cada año, incluyendo los impactos ambientales (FAO, 2015).

En la actualidad, el sistema de suministro de agua presenta grandes ineficiencias. Incluso en los países desarrollados, las pérdidas en las redes de suministro de agua pueden superar el 30%. Principalmente en las zonas urbanas, los sistemas de suministro de agua son propensos a fugas y pérdidas, esto se debe a que en muchas ocasiones los asentamientos urbanos se encuentran distantes de los recursos hídricos (CONAGUA, 2016).

Es por esto por lo que las plantas de desalación pueden cubrir un papel muy importante en el futuro próximo. A nivel mundial ya se cuenta con diversos métodos de desalación que entregan buenos resultados al momento de su implementación. Métodos como la osmosis inversa, la evaporación instantánea de múltiple efecto, la evaporación de múltiple efecto y la electrodiálisis, entre otros, son métodos que en la actualidad ya se emplean con toda seguridad en diversos países.

Una gran ventaja que se tiene este tipo de plantas de desalación es su versatilidad con respecto al tamaño de la instalación. Es decir, se pueden fabricar dependiendo de las necesidades de cada zona promoviendo de este modo que se puedan instalar directamente en las áreas donde se requiere el abasto de agua potable eliminado así las grandes instalaciones de redes hidráulicas y por consiguiente las pérdidas que en ellas se tienen.

Al conjugar las plantas de desalación con las energías renovables se tiene una excelente herramienta para proteger el medio ambiente al mismo tiempo que se obtiene agua apta para consumo humano. El estudio de las características de los procesos de desalación, así como las características de las energías renovables y las ventajas que se obtienen al empalmar ambas tecnologías se describirán en los siguientes capítulos.

1.6. Situación actual de México

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el año 2015, México ocupaba el undécimo lugar entre los países con mayor número de población a nivel mundial con poco más de 121 millones de habitantes. De 1950 a 2015, la población en nuestro país ha aumentado 4.5 veces y se estima que para el 2030 la población llegue a los 137.5 millones de habitantes.

La cantidad total de agua renovable con la que se contaba para 2015 era de 446,777 millones de metros cúbicos, es decir 3,692 m³/persona/año, esta cantidad se considera que podrá reducirse a 3,250 m³/persona/año para el 2030. El grado de presión que se obtiene al dividir el agua usada por el ser humano entre el agua renovable de la región, fue para el 2015 de bajo nivel, 19.2%, considerando que cuando es mayor de 40% es “Alto” y menor a 10% es “Sin estrés” (CONAGUA, 2016).

En comparativa con otros países, para cubrir nuestros requerimientos de bienes y servicios, los mexicanos consumimos prácticamente 50% más de agua que el promedio mundial con 1,978 m³/persona/año.

Los datos anteriores solo brindan una visión parcial de la problemática actual del agua en nuestro país, es necesario considerar la desigualdad en el incremento poblacional y en la distribución del recurso hídrico. Por lo tanto, se debe tener en cuenta que aproximadamente el 30% del total de la población habita en 36 localidades con más de medio millón de habitantes, principalmente en zonas metropolitanas, el 7.5% de la población no cuenta con sistemas de

agua potable, el 80% de la población habita en el centro, norte y noroeste del país y contrastantemente, en esa región solo se cuenta con el 33% del total del agua renovable (INEGI, 2017).

Debido a estos factores, para tener una visión más precisa de la problemática actual del agua, es necesario realizar un análisis más específico de cada una de las entidades federativas que conforman nuestro país. En la tabla 1.2, se muestran los datos geográficos y socioeconómicos de cada una de las entidades federativas.

Para subsanar la problemática del agua para consumo humano, para el 2015 operaban en nuestro país 874 plantas de potabilizadoras de las cuales prácticamente la mitad emplean métodos de desalación, siendo la ósmosis inversa la tecnología más empleada con un total de 301 plantas (CONAGUA, 2016).

Tabla 1.2.
Datos geográficos y socioeconómicos por entidad federativa para el 2015.

Entidad Federativa	Superficie continental (km ²)	Agua renovable (hm ³ /año)	Población a mediados de 2015 (millones de hab.)	Agua renovable per cápita (m ³ /hab./año)	Aportación al PIB nacional 2014 (%)	No. De municipios
Aguas Calientes	5,618	514	1.29	399	1.21	11
Baja California	71,446	2,989	3.48	858	2.79	5
Baja California Sur	73,922	1,264	0.76	1,654	0.74	5
Campeche	57,924	14,274	0.91	15,723	4.24	11
Ciudad de México	1,486	478	8.85	54	16.52	16
Coahuila de Zaragoza	151,563	3,151	2.96	1,064	3.40	38
Colima	5,625	2,136	0.72	2,952	0.60	10
Chiapas	73,289	112,929	5.25	21,499	1.79	118
Chihuahua	247,455	11,888	3.71	3,204	2.84	67
Durango	123,451	13,370	1.76	7,576	1.23	39
Estado de México	22,357	5,190	16.87	308	9.30	125
Guanajuato	30,608	3,856	5.82	663	4.18	46
Guerrero	63,621	21,097	3.57	5,913	1.51	81
Hidalgo	20,846	7,256	2.88	2,521	1.70	84
Jalisco	78,599	15,654	7.93	1,974	6.54	125
Michoacán de Ocampo	58,643	12,547	4.60	2,730	2.43	113
Morelos	4,893	1,797	1.92	936	1.16	33
Nayarit	27,815	6,392	1.22	5,223	0.67	20
Nuevo León	64,220	4,285	5.09	843	7.29	51
Oaxaca	93,793	55,362	4.01	13,798	1.61	570
Puebla	34,290	11,478	6.19	1,853	3.16	217
Querétaro	11,684	2,032	2.00	1,014	2.17	18
Quintana Roo	42,361	7,993	1.57	5,076	1.62	10
San Luis Potosí	60,983	10,597	2.75	3,848	1.92	58
Sinaloa	57,377	8,682	2.98	2,909	2.09	18
Sonora	179,503	7,018	2.93	2,393	2.91	72
Tabasco	24,738	31,040	2.38	13,021	3.14	17
Tamaulipas	80,175	8,928	3.54	2,520	3.04	43
Tlaxcala	3,991	908	1.28	711	0.56	60
Veracruz de Ignacio de la Llave	71,820	50,880	8.05	6,323	5.09	212
Yucatán	39,612	6,924	2.12	3,268	1.52	106
Zacatecas	75,539	3,868	1.58	2,454	1.02	58
TOTAL	1,959,248	446,777	121.01	3,692	100.00	2,457

Fuente: Atlas del agua en México 2016

2. PROCESOS TÉRMICOS DE DESALACIÓN: EVAPORACIÓN SÚBITA, EVAPORACIÓN MÚLTIPLE EFECTO Y COMPRESIÓN DE VAPOR

En la actualidad, existen diversos procesos mediante los cuales se puede conseguir una óptima desalación del agua de mar, estos procesos se clasifican generalmente en dos grupos; en el primero de ellos se engloba a los procesos térmicos, en este tipo de procesos se emplea una fuente de calor para provocar en el agua de mar un cambio de estado, de líquido a vapor, es decir, el agua de mar es calentada hasta evaporarla, para posteriormente condensar el vapor que se obtuvo, generándose así un caudal de agua dulce, que es el objetivo del proceso, y otro caudal con el agua sobrante se desecha como salmuera concentrada. Entre los principales procesos térmicos de desalación se destacan: evaporación súbita, evaporación múltiple efecto y compresión de vapor. En el otro grupo de procesos se emplean membranas para la desalación del agua de mar que separan el agua salina en dos vertientes, una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y en la otra vertiente una corriente de salmuera concentrada. Los procesos más utilizados para desalar agua de mar mediante membrana son ósmosis inversa y electrodiálisis.

En este capítulo se describirán los tres principales procesos térmicos de desalación.

2.1. Evaporación instantánea de múltiple efecto

La destilación mediante el proceso de evaporación instantánea de múltiple efecto (EIME) se realiza mediante un sistema multietapa en el cual el agua salada a una dada presión se introduce en un recipiente a una presión inferior lo que permite la evaporación súbita. Este proceso se repite a lo largo de un cierto número de etapas en las que la presión continúa disminuyendo según las distintas condiciones.

Este tipo de destilación térmica es la que más se utiliza a nivel mundial, sobre todo en países del Medio Oriente, y es muy recomendable para agua de mar; las plantas destiladoras que emplean este método, tienden a tener una capacidad mucho mayor que la de otro tipo de plantas destiladoras térmicas. El principal inconveniente de estos procesos es su alto consumo específico de energía, el cual se encuentra entre los más altos de entre los procesos conocidos, lo que limita su uso tan solo a los países en los cuales los costos de la energía sean económicos.

Una planta de evaporación súbita se compone de diversos componentes, los principales son los siguientes:

- Equipo de pretratamiento.
- Evaporador multietapas.
- Calentador principal.
- Eyectores de vacío.

La destilación mediante el método de evaporación instantánea, se basa en la reducción abrupta de la presión en la salmuera por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, debido a esto, ocurre una evaporación espontánea en la misma. Esto origina que solo un pequeño porcentaje del agua se evapore, por lo tanto, para que se pueda conseguir una buena producción de destilado, la planta debe de operar en una serie de etapas sucesivas que funcionen a presiones inferiores progresivamente. Esto por lo general se logra, utilizando vapor de una fuente externa para elevar previamente la temperatura del agua de mar hasta su punto de ebullición, para después introducirla a través de un orificio a una cámara flash con la finalidad de provocar una caída de presión suficiente para que sea menor la presión de saturación a esa temperatura, generando así la evaporación de una pequeña cantidad del agua salada. La evaporación se genera de una manera violenta y turbulenta, lo cual provoca que una mayor superficie del agua quede expuesta, lo cual beneficia la producción de vapor. El vapor generado se hace pasar a través de desnebulizadores en donde es despojado de las pequeñas gotas de salmuera que lleva consigo, para después condensarse sobre la superficie de los tubos de alimentación del agua de mar, en este paso se obtiene dos beneficios; el primero es la condensación del vapor que resulta en el producto del proceso, es decir, el destilado final y el segundo beneficio es el que se obtiene al precalentar el agua de mar que alimenta a la planta, usualmente hasta 90-92 °C.

El calentamiento final de la salmuera se lleva a cabo en una cámara, comúnmente nombrada “sector de calentamiento” o “calentador de salmuera”, ahí el agua de mar eleva su temperatura a aproximadamente 100°C, este calentamiento se efectúa con vapor que ingresa a dicha cámara de una fuente externa y condensa sobre los tubos que conducen la salmuera de alimentación. La temperatura alcanzada por la salmuera en el calentador se le llama “top”. El aumento de la temperatura de la salmuera en el sector de calentamiento, está determinado por la optimización del costo de producción del agua en función de la relación del número de etapas y de la razón de ganancia de salida, (GOR por sus siglas en inglés Gained Output Ratio). El GOR es una medida de cuánta energía térmica se consume durante el proceso de desalinización, es decir, la relación entre la cantidad de destilado producido y el vapor que se consume para su obtención.

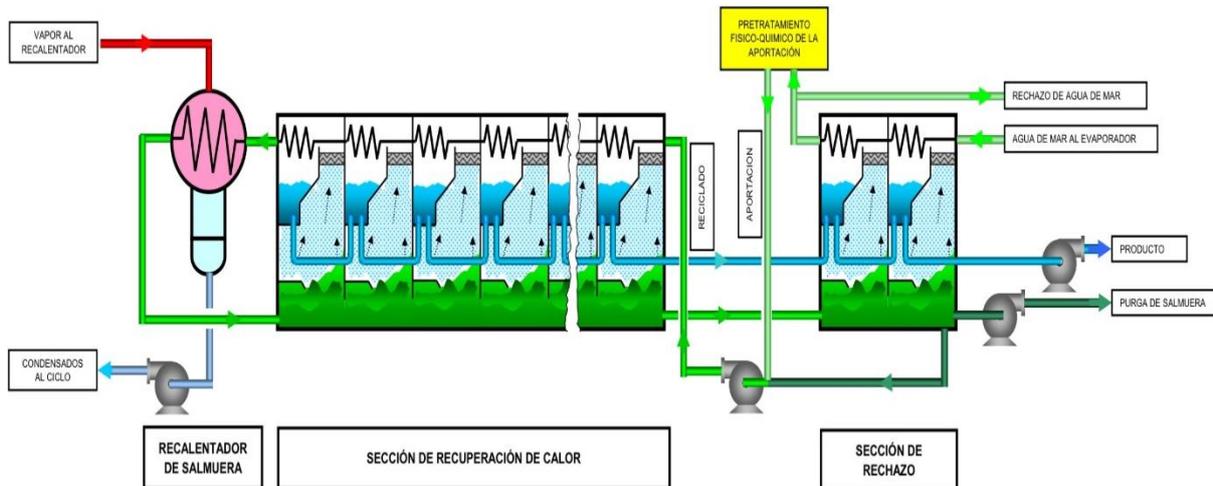


Figura 2.1. Diagrama simplificado de una planta de evaporación instantánea múltiple efecto, configuración "once-through".
Fuente: ECOAGUA. (2009). Desalación mediante evaporación instantánea multietapa.

Después de elevar su temperatura, la salmuera de alimentación es llevada a una “primera etapa” que está conformada por una cámara de intercambiadores de calor y en su parte inferior cuenta con una cámara flash que propicia la evaporación parcial de la salmuera. La presión a la que se encuentra esta cámara, es inferior a la presión de la cámara que la antecede y corresponde a la presión de saturación de la salmuera, por lo cual se inicia inmediatamente el proceso de ebullición. El vapor que se genera durante la ebullición del agua de mar, se condensa sobre la superficie de los tubos que conducen la salmuera de alimentación, los cuales atraviesan por el interior de esta cámara, como se muestra en la figura 2.1. El condensado que se obtiene en esta etapa es colectado y enviado a la siguiente etapa, donde se repite el proceso de evaporación-condensación y la salmuera que no se evapora también es llevada a la siguiente etapa pero con una concentración salina más elevada, este procedimiento se repite en diversas etapas y en cada una de ellas la presión relativa va disminuyendo, es debido a esta secuencia de pasos que este proceso se conoce como multietapa, puesto que de no realizarse de este modo la cantidad de energía que se requeriría para desalar el agua de mar sería excesiva, lo cual haría inviable el proceso. El resultado final de este proceso son dos caudales; el primero de ellos entrega el condensado obtenido en todas las etapas, la pureza del agua que se obtiene es casi total pues en la mayoría de los casos es menor a las 10 ppm, aun y cuando la planta se alimente con salmuera que contenga 35,000 ppm, y el segundo caudal obtenido es el que se encarga de trasladar la salmuera de desecho, la cual tiene una concentración de sales muy elevada y generalmente es vertida nuevamente al mar. El porcentaje de destilado producido en relación con la cantidad de agua salada que ingresa en la planta, depende principalmente de la temperatura “top” a la que opere la planta y de las características del agua con la que se alimenta la misma. Se ha estimado que el porcentaje de destilado producido por las plantas de tipo EIME es del 12 al 20%, con rangos de temperatura “top” de 88 a 113 °C (Ros, 2011).

Las plantas de EIME pueden diseñarse para un GOR práctico de hasta aproximadamente 11:1. Al incrementarse el GOR los costos económicos también se incrementa, esto se debe a que a un mayor GOR, se requiere una mayor área de transferencia de calor y con ello un mayor

número de etapas. La razón óptima de ganancia de salida se encuentra por lo general en un rango de entre 7 y 9, dependiendo de los costos de energía que tenga la planta.

Para que una planta de EIME tuviese un GOR de 8:1, tendría que estar conformada por entre 16 y 28 etapas con recuperación de calor y un precalentamiento a la entrada del agua de mar, así como 3 extracciones de calor con descarga al medio.

Existen dos tipos de configuraciones en la construcción de las plantas EIME, la primera de ellas es conocida como “once-through” mostrada en la figura 2.1, donde el agua de alimentación precalentada no es recirculada, el otro tipo de configuración se denomina con rechazo de calor y en ella se recircula la salmuera para disminuir la cantidad de agua de alimentación y el consumo de aditivos químicos empleados en su tratamiento. Otra diferencia que se puede realizar en la construcción de una planta EIME, es la forma de su sistema de tuberías por donde circula el agua de mar, las cuales pueden estar conformadas por tubos rectos de gran longitud o por un conjunto de tubos entrecruzados.

2.2. Destilación por múltiple efecto

En las plantas que utilizan el método de evaporación por múltiple efecto (EME) el agua que se desea desalinizar se hace pasar a través de un conjunto de evaporadores instalados en serie. El aporte de energía primaria que se requiere en este proceso se realiza en el primer efecto, después de éste, el vapor generado se emplea para evaporar el agua del efecto siguiente, esta acción se repite hasta culminar todos los efectos.

Las plantas EME están constituidas por tres sistemas principales:

- Sistema de pretratamiento
- Sistema de evaporación multiefecto
- Sistema de evacuación de gases no condensables

En la destilación mediante el proceso EME se emplea el mismo principio que en la destilación por EIME con una diferencia en su forma de llevar a cabo la evaporación del agua de mar, debido a que mientras que en las plantas EIME la evaporación súbita se realiza de forma directa por la diferencia de presiones a la que se somete el agua, en el proceso EME se emplean diversos evaporadores de película delgada en donde la evaporación del agua se lleva a cabo de forma natural en una de las caras de los tubos que conforman los intercambiadores, aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor que se genera en la otra cara de los mismos. Debido a esto, se logra un mejor coeficiente de transferencia de calor que los que se pueden conseguir en los procesos EIME.

Para la fabricación de una planta EME se pueden emplear diferentes tipos de evaporadores, entre ellos se encuentran: los de tubos horizontales y verticales con película descendentes, los de tubos verticales con película ascendente y los de tipo plato.

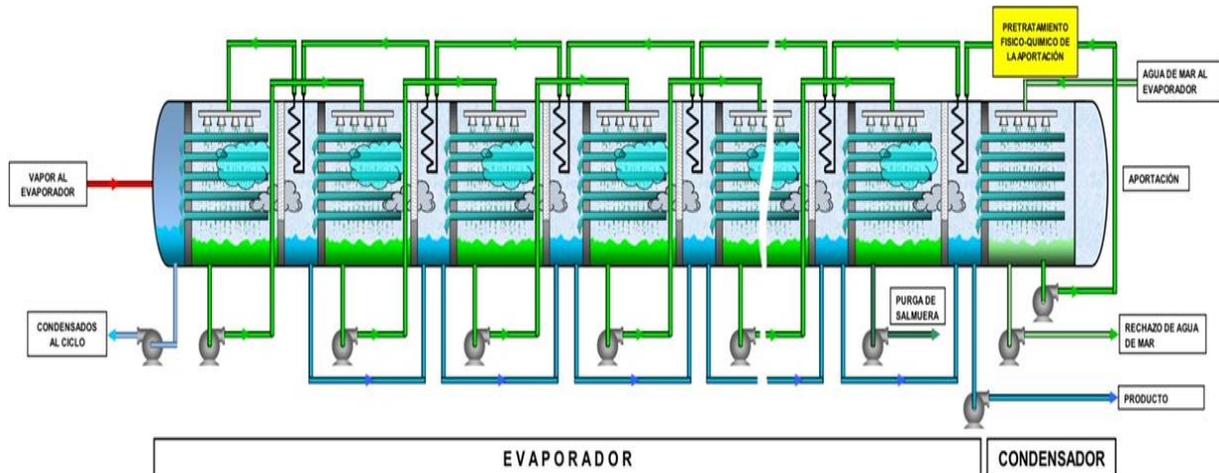


Figura 2.2. Diagrama simplificado de una planta de destilación por múltiple efecto.

Fuente: ECOAGUA. (2009). Desalación mediante evaporación múltiple efecto en tubos horizontales.

En la figura 2.2 se ejemplifica el proceso de destilación por múltiple efecto y en ella se puede apreciar la sucesión de efectos en los cuales se evapora el agua a desalinizar, siendo el primer efecto alimentado por una fuente de energía calorífica externa (vapor a una temperatura de entre 80 y 100 °C) y en el resto de las etapas se va utilizando el calor que se obtiene durante la condensación del vapor producido en la etapa anterior. Mediante este procedimiento, se logra que la temperatura del agua de alimentación se eleve entre 2 y 3 °C por etapa, hasta igualarse con la temperatura del vapor de alimentación. Como consecuencia de esto, el condensado va disminuyendo su temperatura hasta igualarse a la temperatura del agua de alimentación. Todo este proceso se realiza en todas sus etapas a una presión de vacío constante de aproximadamente 5 kPa, la cual equivale a una temperatura de ebullición de 33 °C (Ros, 2011).

De manera más detallada se puede describir el proceso que se desarrolla dentro de una planta EME de la siguiente manera:

1. El agua de mar de alimentación se precalienta con el calor que se desprende por la condensación del vapor generado en el último efecto y por parte del vapor generado en los efectos anteriores.
2. Esta agua ingresa al primer efecto para aumentar su temperatura, con el vapor obtenido de la fuente de energía externa, hasta el punto de ebullición. El agua de mar es rociada sobre la superficie de los tubos del evaporador en donde forma de manera inmediata una película delgada la cual propicia una rápida ebullición y evaporación.
3. El vapor que se produce en este efecto es colectado y enviado al interior de los tubos del evaporador del efecto posterior, y en parte para precalentamiento del agua de alimentación, el cual se encuentra a una temperatura y una presión inferiores. La salmuera residual que proviene del primer efecto se envía al siguiente efecto donde se repite el proceso, dependiendo del número de efectos que presente la planta.
4. El condensado que se genera dentro de los tubos de los intercambiadores de calor, forma parte del destilado final que se desea obtener en este proceso, por lo tanto, es colectado y transportado mediante tuberías que lo unifican con el destilado que proviene del condensador principal, el cual se encuentra instalado al final del último efecto del sistema.

En algunas plantas EME, también llegan a ser instaladas cámaras de evaporación flash entre cada efecto para conseguir la evaporación de una porción de la salmuera que pasa al siguiente efecto, gracias a que operan a una menor presión.

Los principales factores limitantes al momento de la planificación y construcción de una planta del tipo EME, son:

- El número de efectos que puede tener la planta se ve limitado por el rango de temperatura total disponible y la diferencia de temperatura mínima requerida entre cada efecto.
- La temperatura de salida del último efecto, también llamada temperatura “bottom end”, se encuentra normalmente limitada por la temperatura del agua de alimentación que actúa al mismo tiempo como refrigerante.
- La temperatura del primer efecto, temperatura “top”, está limitada por las probables incrustaciones que se pueden generar de acuerdo a la calidad del agua de alimentación.
- La temperatura entre cada efecto se encuentra limitada por la elevación del punto de ebullición, las pérdidas de presión entre cada efecto y la necesidad de tener una diferencia de temperatura mínima que permita la obtención de un caudal de destilado razonable en un evaporador de tamaño finito.

Existen algunos métodos para controlar la formación de incrustaciones al interior de los efectos. Uno de estos métodos es mediante la utilización de polímeros, en estos casos, se diseña el funcionamiento de la planta generalmente a una baja temperatura en el primer efecto, del orden de entre los 65 y 70 °C, con lo cual se limita la formación de las incrustaciones.

En las plantas de tipo EME la razón de ganancia de salida (GOR) es aproximadamente igual al número de los efectos menos uno, es decir:

$$GOR = n - 1 \quad (2.1)$$

Donde n = número de efectos.

Por ejemplo, si se desea tener una planta EME con un GOR de 8:1, se debe de diseñar la planta con 9 efectos. Por tanto, se requieren mucho menos efectos o etapas que en una planta del tipo EIME que tenga el mismo GOR, aunado a esto se debe de considerar que el consumo eléctrico de una planta EME es menor que el que se requiere en una planta EIME, debido a que se requieren menor cantidad de bombas de circulación durante su operación al no existir recirculación de salmuera. Todo esto repercute en una importante reducción de costos de operación entre una tecnología y otra.

El porcentaje de destilado producido con este tipo de tecnología se encuentra entre el 30 y el 40%, con rangos de temperatura “top” de operación de 71 a 113 °C, dependiendo de la calidad del agua de alimentación.

Algunas plantas de tipo EME presentan un costo de inversión mayor que las plantas del tipo EIME, pero su operación es más sencilla y, como ya se mencionó, sus costos de operación son menores, lo que a mediano y largo plazo las convierte en una mejor elección.

La tecnología EME se emplea fundamentalmente en plantas de tamaño medio y su implementación se recomienda cuando se tienen fuentes aprovechables de calor de residuo, ya sea vapor de escape de turbinas, motores diésel, turbinas de gas, etc., también se recomienda en las instalaciones de cogeneración (en las que existe un considerable ahorro energético) y cuando no se puedan aplicar otros procesos.

2.3. Compresión de vapor

En términos generales, el proceso de destilación por compresión de vapor CV, consiste en evaporar el agua de mar para posteriormente, con la ayuda de un compresor, aumentar la temperatura de condensación del vapor generado, el cual finalmente se condensa en un intercambiador de calor, enfriado con la misma agua de mar que alimenta la planta, para de esta manera obtener el destilado final.

De manera esquemática, un sistema de destilación por compresión de vapor se puede seccionar en las siguientes etapas (Ros, 2011):

- Etapa de pretratamiento.
- Etapa de calentamiento, mediante intercambiadores de calor.
- Etapa de eliminación de gases no condensables.
- Etapa de evaporación, la cual se lleva a cabo en una cámara principal y en tubos de evaporación-condensación.
- Etapa de compresión.
- Etapa de postratamiento.

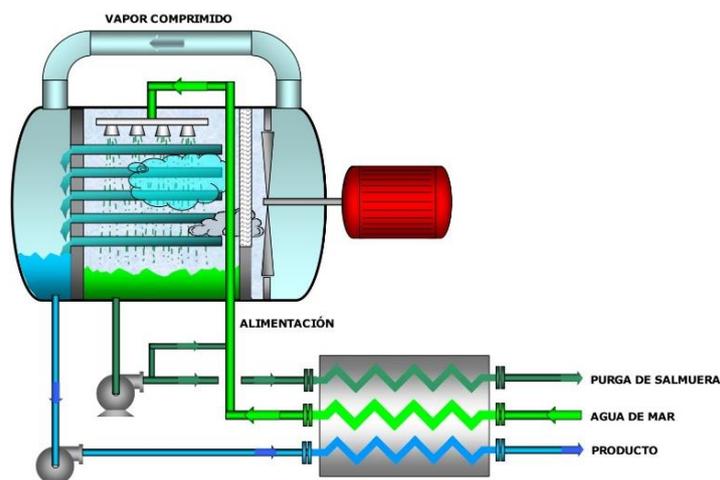


Figura 2.3. Diagrama simplificado de una planta de destilación por compresión de vapor.
Fuente: ECOAGUA. (2009). Desalación mediante compresión de vapor.

Como se puede observar en la figura 2.3, la evaporación del agua de mar se produce en la parte inferior de la cámara y mediante una bomba o eyector de vacío, se eliminan previamente los gases incondensables (aire). El vapor generado se extrae por medio del compresor, en donde se

hace circular por el interior de las tuberías en las cuales se lleva a cabo la condensación del mismo.

Al comprimir el vapor de agua se provoca también que aumente su temperatura de condensación y al enfriar el condensador, utilizando como refrigerante el agua de alimentación, se logra la condensación del vapor para obtenerse de esta manera el agua destilada, la cual es extraída del evaporador por medio de una bomba. En el interior del evaporador es necesario mantener la salinidad del agua constante, por lo tanto, parte de la salmuera que se emplea como refrigerante se desecha al mar y para compensarla, junto con la cantidad del destilado producido, se introduce más agua de mar. Como la temperatura de la salmuera y del destilado producido es más elevada que la del agua de alimentación, se les hace pasar por un intercambiador de calor en donde se aumenta la temperatura del agua que entra a la planta, recuperando de este modo gran parte de la energía calorífica del proceso. Estos intercambiadores son necesarios debido a que el número de etapas en este proceso es reducido y es preciso recuperar la energía térmica que contienen tanto la salmuera de residuo como el destilado final. Aunado a los intercambiadores de calor se requiere en algunos casos, durante el arranque de la planta, de una fuente externa de calor para incrementar la temperatura del agua de alimentación, así como de los dispositivos encargados del tratamiento del agua al comienzo y al final del proceso de destilación.

A diferencia de las plantas EIME y las plantas EME, en la destilación por compresión de vapor no se requiere de fuentes externas de calor en su primera etapa para su funcionamiento, el calor que se emplea para elevar el agua de mar hasta su punto de ebullición se obtiene directamente del vapor que se extrae del evaporador y es reinyectado en la primera etapa luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación.

Existen dos tipos de compresores de vapor que se pueden emplear en estos sistemas y dependiendo del compresor empleado, las plantas se pueden clasificar como: plantas tipo CMV que emplean un compresor mecánico y plantas tipo CTV que emplean un termocompresor (ECOAGUA, 2009).

En las plantas de tipo CMV la energía que el compresor aporta al sistema determina la magnitud del aumento en la temperatura del agua a desalar y la eficiencia de la planta. Para que las plantas de este tipo tengan una buena eficiencia con un bajo ingreso de energía, la diferencia de temperatura para lograr la evaporación del agua debe de ser pequeña, por lo tanto, se requiere de una superficie amplia para llevar a cabo dicha evaporación, lo que conlleva un alto costo de capital. Al igual que en los demás procesos es necesario conseguir un equilibrio adecuado entre los costos de capital y los costos de operación para que el mantenimiento del proceso sea rentable.

En las plantas que emplean la compresión mecánica de vapor (CMV) se requiere durante su arranque de una fuente de energía adicional para conseguir que el agua de mar llegue a su temperatura de ebullición. Para este fin, se puede hacer uso una simple resistencia eléctrica, pero por lo general se emplea vapor externo de baja presión. Una vez que se logra alcanzar la

temperatura de operación de la planta, el encargado de ingresar la mayor cantidad de energía al sistema es el compresor y únicamente se requiere de la fuente de calor externa para la reposición de las pérdidas térmicas que sufre el sistema (make-up). La cantidad de energía que consume el compresor depende de tres factores: el caudal de vapor con el que trabaja, de la diferencia de temperatura que se presenta en el evaporador y de la temperatura de evaporación. Al igual que en las plantas EME, en la fabricación de las plantas tipo CMV se pueden emplear evaporadores con una configuración de tubos verticales y con configuración de tubos horizontales, así como los evaporadores de tipo plato. Su operación puede variar dependiendo de la temperatura de evaporación a la que trabajen, debido a que existen plantas que trabajan con una evaporación a alta temperatura y plantas que trabajan con una evaporación a baja temperatura, la cual oscila entre los 62 y los 65 °C, dependiendo del nivel de vacío al que estén operando.

La capacidad de las plantas tipo CMV se ve limitada por 4 factores, los cuales son:

- El flujo volumétrico máximo del compresor,
- La presión desarrollada por el compresor,
- La temperatura a la que opera, y
- La capacidad que presente el evaporador para la transferencia de calor.

En las plantas de tipo CTV también se emplean evaporadores de tubos horizontales, de tubos verticales y de tipo plato, pero en estas plantas se consigue una mejora en el proceso de evaporación mediante el uso de configuraciones del tipo de película delgada ascendente, descendente y rociada. Debido a que la eficiencia de los eyectores de vapor es menor que la de los compresores centrífugos, las plantas de tipo CTV por lo general se construyen con un gran número de efectos para lograr que la eficiencia global de la planta se encuentre en rangos razonables. Al igual que en las plantas de tipo CMV, las plantas de tipo CTV pueden operar a altas temperaturas y a bajas temperaturas, siendo estas últimas las que más se emplean en la actualidad y al igual que en las plantas de tipo CMV los rangos de estas temperaturas se encuentran entre los 62 y los 65 °C, dependiendo del nivel de vacío al que operen.

A pesar de que las plantas de compresión de vapor presentan el menor consumo específico de entre todos los tipos de plantas de destilación, tienen también un enorme inconveniente, en la actualidad no existen compresores volumétricos de vapor de baja presión de un tamaño suficiente que les permita a este tipo de plantas una producción considerable de destilado. Es debido a esto que no se tiene registro de unidades de compresión de vapor mayores a los 5000 m³/día, estos compresores tan sólo permiten un máximo de tres etapas a diferentes presiones, interconectadas en forma de cascada.

La cantidad de destilado producido por plantas de tipo CV depende de la calidad del agua de alimentación y de su temperatura. El porcentaje de agua desalada que se obtiene en este proceso es de aproximadamente un 40 a un 50%, con rangos de temperatura que van desde la temperatura ambiente hasta los 88 °C.

3. PROCESOS DESALADORES DE MEMBRANA: ÓSMOSIS INVERSA Y ELECTRODIÁLISIS

En los procesos de desalación mediante membrana se incluyen todos aquellos procedimientos que se han desarrollado a lo largo de la historia y que tienen como finalidad la separación de algún componente de una solución, mediante la implementación de una membrana. Por lo tanto, en esta clasificación pueden englobarse desde los procesos de filtración más elementales hasta las tecnologías más sofisticadas como son la ósmosis inversa y la electrodiálisis. Así mismo, los elementos a separar pueden ser sólidos en suspensión, elementos en solución o inclusive iones.

A principios del siglo XIX se instalaron los primeros sistemas de filtración de agua para el uso de grandes poblaciones y algunos de estos procesos no han sufrido grandes cambios en sus principios de operación, tan solo se han realizado mejoras en la calidad y eficiencia de los materiales y los equipos que emplean. En un principio la filtración de agua mediante membranas se limitaba a eliminar los elementos sólidos a una escala máxima de macromoléculas, pero gracias a los avances tecnológicos de los últimos tiempos, en la actualidad existen procesos capaces de realizar la separación de elementos a niveles micromoleculares o iónicos.

Tabla 3.1.
Procesos de filtración y sus rangos de separación.

Tipos de procesos de filtración	
Proceso	Grado de separación en micras
Filtración multicapa	> 100
Filtración cartuchos	> 1
Filtración sobre precapa	> 0.5
Microfiltración	> 0.1
Ultrafiltración	> 0.01
Nanofiltración	0.001 – 0.01
Ósmosis Inversa	< 0.04
Electrodiálisis	< 0.03

En la tabla 3.1 se enumeran diversos tipos de procesos de filtración y aunque más adelante en este capítulo solo se hablara de los procesos capaces de realizar la eliminación de las sales en el agua, para mejor entendimiento de los mismos, a continuación, se describirá brevemente su principio de funcionamiento.

En los primeros cinco procesos enlistados en la tabla 3.1, el flujo agua atraviesa de manera directa la membrana, la cual deja pasar el líquido, pero detiene algunos de los elementos que éste lleva consigo (ver figura 3.1). Estos procesos se catalogan como filtración directa y tienen la característica de que el volumen de agua filtrada que se obtiene como producto es casi igual al volumen de agua que ingresa al proceso. Los procesos de nanofiltración y de ósmosis inversa se rigen bajo el mismo principio de funcionamiento, es por ello que algunos autores catalogan a la nanofiltración como un proceso de ósmosis inversa con un límite inferior de filtración, en este caso el caudal del agua incide en la membrana de manera transversal, por lo cual se generan dos corrientes de agua, la primera de ellas atraviesa la membrana mientras que la segunda fluye sobre la superficie de la misma. En este caso la membrana filtra a niveles iónicos.

En la figura 3.1 se muestra de manera esquemática los procesos de filtración y los tipos de elementos que pueden filtrarse en cada uno de ellos.

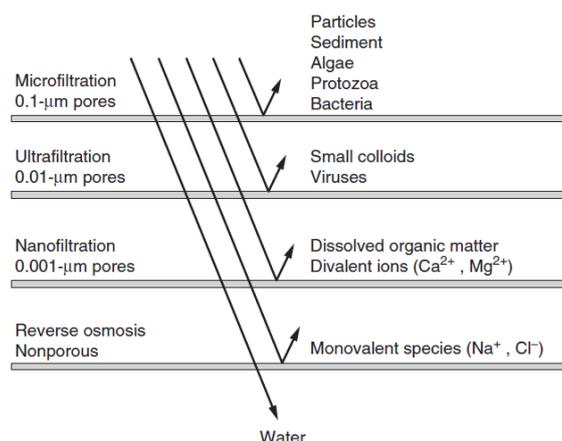


Figura 3.1. Esquema de los rangos de filtración de diferentes procesos de desalación mediante membrana.

Fuente: <http://aquarden.com/technology/membrane-filtration/>

El último proceso de filtración enlistado en la tabla 3.1 es la electrodiálisis, en este proceso la membrana empleada permite el paso de cierto tipo de iones con una carga determinada e impide el paso a los iones que presenten la carga opuesta.

La ósmosis inversa y la electrodiálisis son actualmente los dos métodos más empleados para la desalación de agua mediante el uso de membranas (Germán, 2012), las principales diferencias que existen entre estos dos procesos son las siguientes:

- En la ósmosis inversa el agua es separada de las sales mientras que en la electrodiálisis son las sales las que abandonan el agua, mediante el uso de electrodos de distintas cargas.
- El principio de funcionamiento que se emplea en la ósmosis inversa es la presión osmótica y en la electrodiálisis es el potencial eléctrico.

A continuación, se describen más detalladamente ambos procesos.

3.1. Ósmosis inversa

La ósmosis natural es un fenómeno físico en el cual las moléculas de disolvente se trasladan bidireccionalmente de una solución de menor concentración de soluto a otra con mayor concentración de soluto, estas soluciones se encuentran divididas por una membrana semipermeable. Las partículas del disolvente se desplazan con mayor velocidad a través de la membrana con dirección de la solución que presenta más concentrado de soluto. Este proceso llega a su fin cuando en ambos lados de la membrana se igualan las velocidades de las partículas y por consecuencia, la presión generada por el disolvente sobre la membrana también se iguala, de esta forma deja de existir el flujo de partículas de disolvente. La presión a la que es sometida la membrana se le conoce como presión osmótica.

En las soluciones diluidas, las partículas de soluto no interaccionan de manera significativa entre sí, debido a que se encuentran muy distantes entre ellas. Este comportamiento es similar al que se presenta entre las moléculas de un gas ideal, por lo tanto, para las soluciones diluidas, la presión osmótica (π) se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\pi = \frac{NRT}{v} \tag{3.1}$$

donde:

- N = número de moles del soluto,
- v = volumen de la solución en litros,
- R = constante general de los gases y
- T = temperatura en Kelvin.

Debido a que el cociente obtenido al dividir el número de moles del soluto entre el volumen de la solución representa la concentración de la solución, es decir, la molaridad de la solución, la ecuación anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$\pi = MRT \tag{3.2}$$

Donde M = la molaridad de la solución.

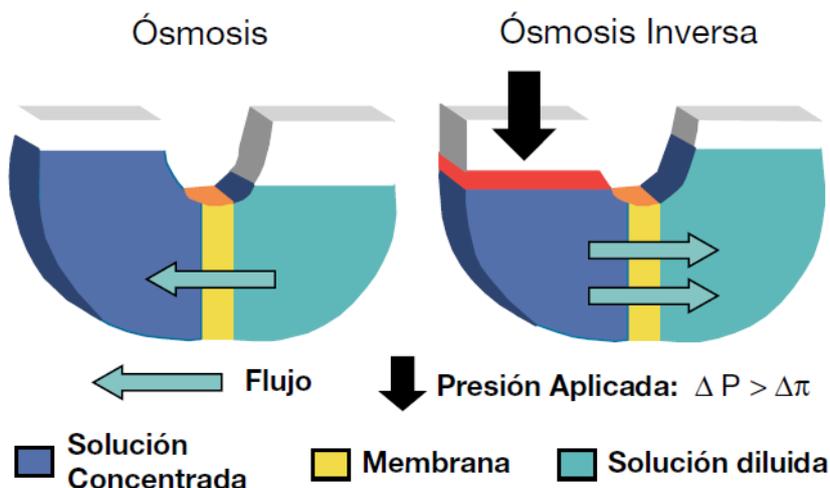


Figura 3.2. Esquema de los procesos de ósmosis natural y ósmosis inversa.
Fuente: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-2-4/osmosis-inversa>

Si a este fenómeno mediante el uso de una bomba, se le aplica una presión del lado de la membrana en el que se encuentra la solución más concentrada, se invertiría el proceso debido a que la dirección en el que se desplazan las partículas del disolvente se modificaría, moviéndose ahora de la solución más concentrada a la solución con menos concentración de soluto. Este nuevo fenómeno que se presenta se le conoce como ósmosis inversa (OI), en el cual la cantidad de agua que se logra hacer pasar a través de la membrana está en función de la presión que se aplica, de las concentraciones que existen en ambas soluciones y de las características de la membrana que se emplea (ECOAGUA, 2009).

De este modo, para poder desalar agua de mar mediante el proceso de OI se requiere principalmente de dos elementos: de una membrana semipermeable y de una bomba que ejerza una fuerza exterior, la cual haga pasar el agua de mar a través de la membrana.

La comercialización de las plantas de OI para la purificación de agua salobre y agua de mar, se realiza desde hace menos de 50 años, por lo que se puede catalogar como una tecnología relativamente nueva, en comparación con otro tipo de plantas de purificación de agua.

Debido a que en la OI no se requiere de incrementar la temperatura del agua que se desea desalar para conseguir un cambio de fase, el consumo energético de estos equipos se emplea casi en su totalidad al momento de presurizar el agua que alimenta a la planta. Existen cuatro configuraciones en las plantas de OI comerciales: las de placa plana, las tubulares, las de arrollamiento en espiral y las de fibra hueca, siendo las dos últimas las más populares en la actualidad y aunque en las cuatro configuraciones la presión fuerza a pasar el agua a través de la membrana, dejando las sales disueltas en el caudal del agua de alimentación, para convertirse posteriormente en salmuera de rechazo (ver figura 3.3), las presiones de operación y la calidad del destilado varían dependiendo de la concentración de sales que presente el agua de alimentación y de la calidad de la membrana que se emplea, la cual debe ser capaz de soportar presiones mayores a la diferencia de las presiones osmóticas de ambas soluciones, actualmente las presiones bajo las que trabajan dichas membranas, en las instalaciones comerciales, varían generalmente entre las 55 y las 70 atmósferas.

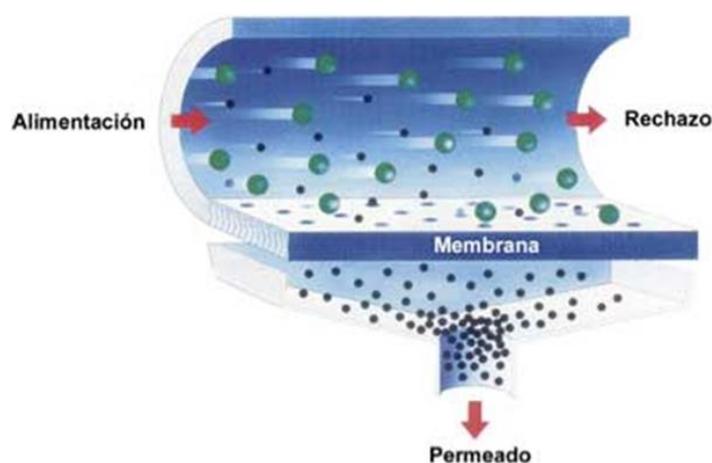


Figura 3.3. Diagrama del proceso de filtración en un sistema de ósmosis inversa.

Fuente: <http://hidroaguamexico.blogspot.mx/2013/07/osmosis-inversa.html>

En las plantas de OI la cantidad de agua que se obtiene como producto final es aproximadamente de entre el 30 al 50% de la cantidad de agua con la que se alimenta a la planta, por lo que tiene una calidad de 300 a 500 ppm de sólidos disueltos totales (SDT) y su consumo de energía oscila entre los 2.8 y 4.2 kWh/m³. El agua que no filtra durante el proceso, es devuelta al mar como salmuera de rechazo. El diseño de estas plantas resulta sumamente flexible, es por ello que pueden ser fabricadas en un amplio rango de capacidades de producción y trabajar con agua de diversos contenidos salinos. El uso de plantas de OI actualmente sigue en ascenso debido al continuo desarrollo tecnológico que ha mejorado la eficiencia del proceso reduciendo al mismo tiempo sus costos.

Durante su diseño y fabricación de las instalaciones de OI se requiere conocer y resolver diversos conceptos y modelos matemáticos para poder obtener un sistema adecuado que permita cubrir los requerimientos que se presentan. A continuación, se describirán brevemente algunos de los conceptos, y las ecuaciones de algunos de ellos, más relevantes al momento de proyectar una planta de OI (Ros, 2011):

PRESIÓN OSMÓTICA.- Es la diferencia de presión generada entre la solución concentrada y la solución diluida. Para calcular la presión osmótica de una disolución es preciso implementar la ecuación planteada por el holandés Jacobus Henricus van't Hoff, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\pi = i \cdot M \cdot R \cdot T \quad (3.3)$$

donde:

π = Presión osmótica, [atm].

i = Factor de van't Hoff, expresa el grado de disociación del soluto.

M = Concentración molar de la disolución, [MOL/L].

R = Constante de los gases, 0.082 [ATM·L/MOL·K].

T = Temperatura, [K].

Debido a que la presión osmótica de una disolución salina es proporcional a su concentración, su cálculo se simplifica mediante el uso de cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\pi = 0.00076 \cdot SDT \quad (3.4)$$

donde:

π = Presión osmótica, [bar].

SDT = Sólidos Disueltos Totales.

o bien,

$$\pi = 0.0762 \cdot (T + 273) \sum m_i \quad (3.5)$$

donde:

π = Presión osmótica, [atm].

T = Temperatura, [°C].

$\sum m_i$ = Concentración molar de la disolución.

PRESIÓN NETA DE TRABAJO (PNT).- La presión neta de trabajo, es la presión que se ejerce sobre la membrana, menos la presión osmótica, menos la contrapresión y se puede calcular mediante la siguiente formula:

$$PNT = P_a - \pi - P_p - 0.5 * P_{Dm} \quad (3.6)$$

donde:

P_a = Presión de alimentación.

P_p = Presión de permeado.

P_{Dm} = Pérdida de carga en las membranas, más el ensuciamiento.

ENERGÍA MÍNIMA DE DESALACIÓN (W_{min}).- Es la cantidad mínima de energía que se requiere para presurizar un volumen (V) de cualquier fluido incompresible a la presión (P) y equivale al producto de la presión por el volumen:

$$W_{min} = P \cdot V \quad (3.7)$$

En condiciones ideales, para desalar 1 m³ de agua de mar con una salinidad de 35,000 ppm, una temperatura de 25 °C, con una presión osmótica constante de 27.31 atm y utilizando un factor de conversión de 0.02815, para transformar las unidades de $atm \cdot m^3$ a kWh , se tiene que la cantidad mínima de energía de desalación requerida es de:

$$W_{min} = 27.31 \cdot 1 \cdot 0.02815 = \mathbf{0.769 [kWh]}$$

En el caso de las plantas comerciales de OI en las que la presión de trabajo oscila entre 65 y 70 atmosferas, el consumo ideal de energía que se requiere para hacer pasar el agua de mar a través de la membrana se encuentra en el rango de 1.83 y 1.97 kWh/m³.

VELOCIDAD DE FILTRACIÓN (J).- Dicha velocidad se determina con base en el volumen de solución de alimentación que pasa en un cierto tiempo a través de la membrana por unidad de área. La velocidad de filtración se ve afectada por otros factores como las características del flujo de alimentación, la resistencia que presenta dicho flujo para atravesar la membrana y los sólidos que de él se desprenden y se aglomeran sobre la membrana, por tanto, la velocidad de filtración se puede calcular de la siguiente manera:

$$J = \frac{\Delta P}{\left(\mu \frac{V C_s \alpha}{2A} + R_m\right)} \quad (3.8)$$

donde:

ΔP = Diferencial de presión.

μ = Viscosidad dinámica de la solución de alimentación.

V = Volumen de la solución.

C_s = Concentración de la solución de alimentación.

α = Característica de la plasta o torta de los sólidos que se aglomeran encima del área de filtración de la membrana.

A = Área de filtración.

R_m = Resistencia de la membrana, que depende del grado de porosidad de la membrana y del espesor de la misma.

$\frac{V C_s \alpha}{2A}$ = resistencia de las partículas que se acumulan sobre la membrana.

Como se puede deducir de la ecuación 3.8, la velocidad de filtración se ve afectada directamente por la variación en la presión, por los cambios en la temperatura que modifican la viscosidad del fluido y por los cambios en la concentración de solutos en el fluido de alimentación, debido a que con una mayor concentración de solutos se dificulta más el flujo a través de la membrana.

CAUDAL DE ALIMENTACIÓN (Q_a).- El caudal o flujo de alimentación, es aquel que ingresa a la planta para ser sometido al proceso de desalación.

CAUDAL DE PRODUCTO (Q_p).- Es la porción de agua que atraviesa la membrana en l/m^2h , es decir, es el flujo de agua que ya ha sido desalada y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_p = A \cdot PNT \quad (3.9)$$

Donde A = Coeficiente de transporte de la membrana en $l/m^2h \cdot atm$.

CAUDAL DE CONCENTRADO (Q_c).- Es el flujo de agua que no atraviesa la membrana y que lleva consigo las sales que han quedado retenidas sobre la membrana, se puede conocer mediante la fórmula:

$$Q_c = Q_a - Q_p \quad (3.10)$$

CONCENTRACIÓN DE SALES EN EL AGUA.- Las concentraciones de sales que se presentan en el agua se representan como: C_a , C_p y C_c para las concentraciones del caudal de alimentación, del caudal del producto y del caudal del concentrado respectivamente, y se relacionan entre sí mediante la siguiente igualdad:

$$C_a \cdot Q_a = C_p \cdot Q_p + C_c \cdot Q_c \quad (3.11)$$

Aunque la salinidad de los diferentes caudales se puede conocer realizando mediciones en campo, existen modelos matemáticos que permiten el cálculo de las salinidades. En el caso de la salinidad del concentrado, se puede emplear la fórmula:

$$C_c = (C_a - C_p) \cdot C_f \quad (3.12)$$

Donde C_f = Factor de concentración.

y para la salinidad del producto, se emplea la ecuación:

$$C_p = \frac{(1-R_s) \cdot (C_a + C_c)}{2} \quad (3.13)$$

Donde R_s = Rechazo de sales, expresado en decimales.

TRANSPORTE DE SALES (F_s).- El transporte o flujo de sales, se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$F_s = K_s \cdot (C_a - C_p) \quad (3.14)$$

donde:

K_s = Coeficiente de transporte de sales, en cm/s .

C_a y C_p , en g/cm^3 .

PASO DE SALES (P_s).- El paso de sales es la relación que existe entre la salinidad que presenta el caudal del producto y la salinidad promedio del caudal de alimentación, es decir:

$$P_s = \frac{C_p}{C_a} \quad (3.15)$$

RECHAZO DE SALES (R_s).- El rechazo de sales es uno de los datos más importantes que se deben conocer al momento de seleccionar la membrana que se desea utilizar. Este dato es el inverso

del paso de sales y su resultado se acostumbra a expresar en porcentaje, su representación matemática es:

$$R_s = 100 \cdot (1 - P_s) \quad (3.16)$$

FACTOR DE CONVERSIÓN (F_c).- Este factor resulta de la división del caudal del producto entre el caudal de alimentación y se representa en porcentaje e indica la cantidad de producto que se recupera de un volumen determinado de agua de alimentación, su ecuación es:

$$F_c = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (3.17)$$

FACTOR DE CONCENTRACIÓN (C_f).- Representa el incremento en el número de sales que se genera durante el filtrado, se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$C_f = \frac{100}{(100 - F_c)} \quad (3.18)$$

PROPORCIÓN DE REDUCCIÓN.- Es el factor que indica la calidad de la membrana, permitiendo realizar una fácil distinción entre los diferentes tipos de membranas.

FACTOR DE POLARIZACIÓN (FACTOR β).- La polarización se genera durante el proceso de filtrado debido a las sales rechazadas que se van acumulando muy cerca de la membrana formando una capa de mayor concentración relativa de sales, la razón de esta concentración se conoce como factor β . Este fenómeno aumenta con un mayor factor de conversión y disminuye al incrementar la velocidad con la que el agua traspasa la membrana.

Este dato es de suma importancia al momento de proyectar una planta de OI puesto que repercute directamente en el incremento de la presión osmótica al mismo tiempo que reduce la permeabilidad de la membrana.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD.- Representa la cantidad de agua que permea la membrana por unidad de superficie y por unidad de presión, se puede medir en $\frac{l}{h}/m^2/bar$ o $gpd/ft^2/psi$, donde gpd significa galones por día.

FLUJO MEDIO.- Es la cantidad de agua que atraviesa el área de la superficie de la membrana activa a una presión determinada, se expresa en $LMH (l/m^2/h)$ o en $GFD (galon/ft^2/day)$.

FACTOR DE ENSUCIAMIENTO (ÍNDICE DE DENSIDAD SILT).- Representa el deterioro que sufre la membrana debido al ensuciamiento que en ella se genera, es determinado por la velocidad y el volumen del agua que permea por la membrana a una presión específica en un periodo determinado. Este factor se puede medir mediante el Índice de Densidad Silt (SDI, por sus siglas en inglés), el cual determina el potencial que presenta el agua para bloquear la membrana, debido a su cantidad de partículas coloidales ($> 0.45\mu m$).

FACTOR DE TEMPERATURA.- La vida útil de la membrana y su eficiencia están directamente relacionadas con la temperatura que presenta el agua de alimentación, dicha temperatura afecta principalmente a la presión osmótica y la viscosidad del agua, dificultando la permeabilidad de la misma a través de la membrana. El exceso de presión y temperatura sobre la membrana

generan que los lechos porosos que la constituyen sufran una compactación que disminuya su capacidad de permeado. Por lo general, la temperatura del agua de alimentación debe ser de 25 °C y por cada variación de un grado centígrado que en ella se presente, se estima que la presión osmótica y el flujo permeado varían, en el mismo sentido de la temperatura, alrededor de 0.5 bares y 3% respectivamente. Es decir, si la temperatura aumenta, también lo harán la presión y el flujo permeado, pero a mayor temperatura la calidad del flujo permeado disminuye debido a que también aumenta el paso de sales. La mayoría de las membranas que actualmente se emplean en la OI, presentan severos daños cuando la temperatura del agua de alimentación sobrepasa de los 35 °C.

En las instalaciones actuales de OI, por lo general, se emplean bombas de alta presión, del orden de los 5.4 a los 8.2 MPa, esto ocasiona que el flujo de salmuera que no puede permear la membrana se envíe al exterior de la planta a una alta presión, llevando consigo una cantidad importante de energía. Para recuperar parte de esa energía, se instalan dispositivos del tipo intercambiadores de presión, turbocargadores y turbinas Pelton, con los que es posible recuperar entre el 28 y 30% de la energía de alimentación de la planta. Debido a que en el proceso de OI la mayor parte de la energía se emplea en presurizar el agua de alimentación, la eficiencia de este proceso depende de las bombas de alta presión y de los equipos de recuperación de energía.

El proceso de OI depende también en gran medida de la calidad del agua con la que se alimenta la planta, es por ello que se requiere de tratamientos físicos y químicos antes de filtrar el agua, con la finalidad de reducir riesgos de bloqueos y daños en la membrana. Del mismo modo, el destilado obtenido debe de recibir un tratamiento para equilibrar su pH y su contenido de minerales.



Figura 3.4. Diagrama simplificado del funcionamiento de una planta de ósmosis inversa

En la figura 3.4 se ilustran las etapas principales que conforman una planta OI, las cuales son:

- Captación o suministro del agua de alimentación.
- Pretratamiento (físico-químico).
- Desalación (Filtrado).
- Postratamiento.

3.2. Electrodiálisis

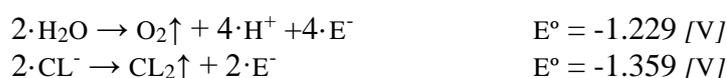
La electrodiálisis (ED) es un proceso electroquímico de filtración que mediante la aplicación de una corriente eléctrica continua (CC) a través de una solución iónica, logra que los iones positivos y negativos migren selectivamente a través de membranas semiimpermeables ocasionando la creación de dos soluciones, la primera solución contiene una baja concentración iónica y es la que se convertirá en el flujo de destilado y la segunda solución contiene una gran concentración iónica convirtiéndose posteriormente en el flujo de salmuera de rechazo (Germán, 2012).

Los efectos que se generan al introducir un par de electrodos, de la manera que se muestra en la figura 3.5, dentro de una solución iónica de cloruro de sodio (NaCl) y aplicarles una CC son los siguientes:

- Los cationes (Na^+) son atraídos hacia el cátodo (electrodo negativo).
- Los aniones (Cl^-) son atraídos hacia el ánodo (electrodo positivo).
- En el cátodo se efectúa una semireacción de disociación del agua, relacionada con la ganancia de electrones (reducción del agua).



- En el ánodo se lleva a cabo una semireacción de disociación del agua, relacionada con la pérdida de electrones (oxidación del agua), también puede ocurrir una reacción de formación de gas cloro.



Transcurrido un cierto tiempo, todos los cationes estarían depositados sobre el cátodo, mientras que todos los aniones se encontrarán sobre el ánodo, obteniéndose de esta manera una cantidad de agua purificada, es decir, libre de iones.

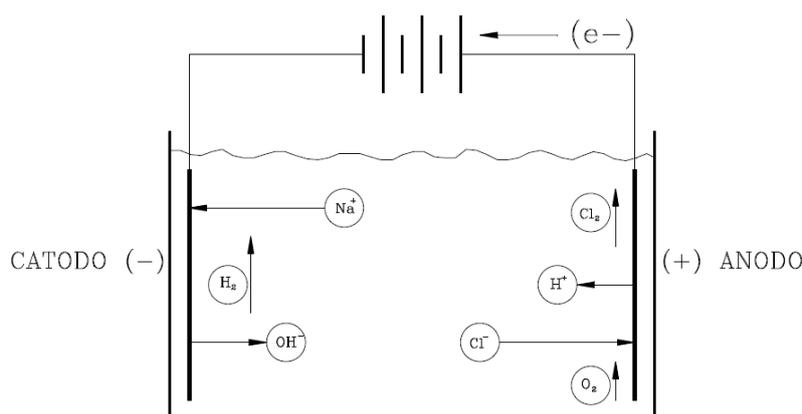


Figura 3.5. Esquema del efecto que genera una CC sobre una solución iónica.

Fuente: <http://www.desalacion.org/wp-content/uploads/2013/08/TECNOLOGI%CC%81A-EDR-v.2.pdf>

Para tener un mejor control sobre el movimiento que originan los electrodos sobre los iones, dentro de la solución iónica, se pueden crear conjuntos de membranas que limiten, de forma ordenada, el paso de los cationes y aniones de tal manera que se obtengan mejores resultados al momento de efectuarse la purificación del agua (ver figura 3.6). Las membranas que se

emplean en la ED se denominan como membranas aniónicas y catiónicas, dependiendo de la función que realicen, es decir:

- Una membrana aniónica: Permite únicamente el paso de los iones cargados negativamente y rechaza a los cargados positivamente.
- Una membrana catiónica: Permite únicamente el paso de los iones con carga positiva, rechazando a los iones con carga negativa.

Ambas membranas son eléctricamente conductoras e impermeable al agua bajo presión.

En la figura 3.6, se muestra la existencia de 6 compartimentos que son divididos por las membranas aniónicas y catiónicas, las acciones que se generan en cada uno de esos compartimentos al momento de aplicar un potencial de CC son (Pérez, 2013):

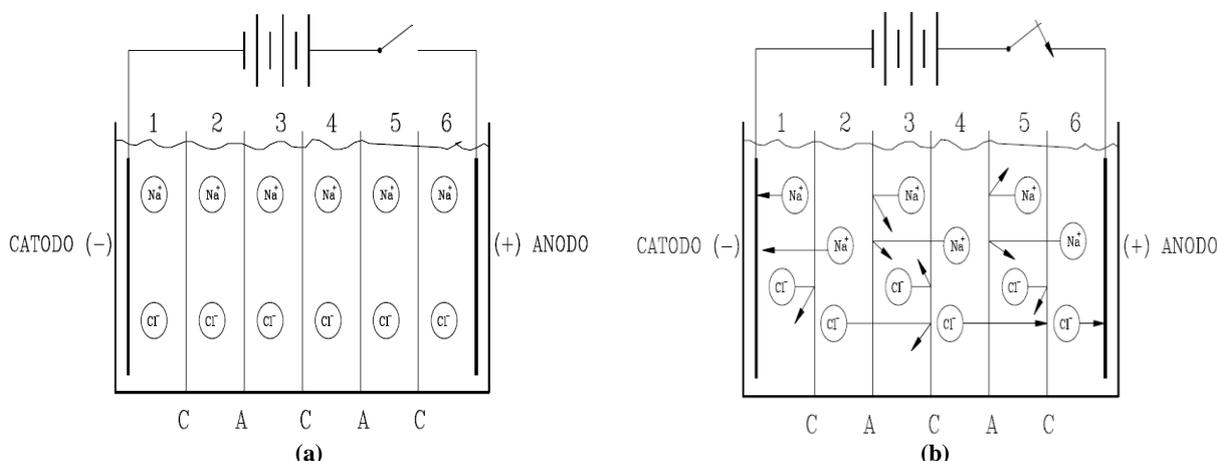


Figura 3.6. Esquema de un conjunto de membranas Aniónicas (A) y Catiónicas (C) sin la aplicación de un potencial de CC (a) y con la aplicación del potencial (b).

Fuente: <http://www.desalacion.org/wp-content/uploads/2013/08/TECNOLOGI%CC%81A-EDR-v.2.pdf>

- a) Compartimento 1.- En él se encuentra instalado el electrodo negativo (cátodo) en el cual se produce gas de hidrógeno e iones OH⁻.
- b) Compartimento 2.- Los aniones (Cl⁻) pasan hacia el compartimiento 3 a través de la membrana aniónica, mientras que los cationes (Na⁺) pasan hacia el compartimiento 1 atravesando la membrana catiónica.
- c) Compartimento 3.- Los cationes son retenidos por la membrana aniónica, del mismo modo, los aniones no pueden pasar por la membrana catiónica y, por tanto, ambos iones, se mantienen en el compartimiento 3.
- d) Compartimento 4.- Los aniones traspasan la membrana aniónica hasta el compartimiento 5, a su vez, los cationes traspasan la membrana catiónica hasta el compartimiento 3.
- e) Compartimento 5.- Los cationes y aniones son rechazados por las membranas aniónica y catiónica, respectivamente, y al igual que en compartimiento 3, se ven obligados permanecer en el mismo compartimiento.
- f) Compartimento 6.- Este compartimento contiene al electrodo positivo (ánodo) donde se producen cloro gas y oxígeno, así como los iones H⁺.

En la figura 3.6b se observa que los compartimentos 2 y 4 quedan libres de iones, debido a que éstos se concentran en los compartimentos 3 y 5. Este fenómeno es la base de los sistemas de electrodiálisis. Es decir, si se apilan diversos conjuntos de membranas, con esta misma configuración, es posible la obtención de dos caudales, el principal de ellos es el del destilado producido y el segundo caudal contiene a la salmuera de rechazo la cual típicamente es entre el 15 o 20% del total del agua con la que se alimenta a la planta, pero en algunas condiciones, la cantidad del flujo rechazado puede llegar a ser de hasta un 30%.

En el proceso de Electrodiálisis se deben de considerar diversas leyes y parámetros, los más representativos son los siguientes (Pérez, 2013):

DISOCIACIÓN DE LAS SALES EN AGUA.- Al momento de efectuarse la disociación de las sales minerales, se forman iones, álcalis y ácidos en el agua. En el caso del cloruro de sodio (NaCl), que es un sólido cristalino, al momento de disolverse y disociarse en el agua, se forman cationes (Na^+) y aniones (Cl^-), los cuales conducen la electricidad por la solución. La concentración de iones, su tipo y la temperatura de la solución, determinaran su conductividad.

Existen algunas materias que al momento de disolverse en el agua no forman soluciones iónicas, un ejemplo de ellas son los azúcares, este tipo de soluciones no conducen la electricidad y por lo tanto no son afectadas por el proceso de ED.

PROPIEDADES DE LAS MEMBRANAS.- Las propiedades más importantes que se deben de tomar en cuenta al momento de seleccionar las membranas para un sistema de ED son; su conductividad eléctrica y su selectividad de iones. Por lo general, la selectividad de iones de las membranas catiónicas y aniónicas es del 90%, para soluciones cuya normalidad oscile entre 0.5 y 0.7, pero tiende a disminuir cuando se presentan concentraciones más elevadas. Este tipo de membranas presentan una baja resistividad que repercute en un menor consumo de energía y un mayor rendimiento de los sistemas. La resistencia de las membranas se ve afectada por la concentración y la temperatura de la solución.

LEY DE FARADAY.- En los procesos de Electrodiálisis, la ley de Faraday indica que para transferir un gramo equivalente de sal, de la sección donde se encuentra la solución diluida a donde se encuentra la solución concentrada, se requiere del paso de la cantidad de 96,500 amperios de corriente eléctrica en un segundo (As). Dicha cantidad es conocida como constante de Faraday y equivale a 26.8 amperios durante una hora (Ah).

Tomando como ejemplo el caso del NaCl y considerado un rendimiento de la corriente del 100%, las cantidades que se transfieren durante el proceso electrolítico por cada 96,500 As , son de un gramo equivalente de iones Na^+ (23 g) hacia el cátodo y un gramo equivalente de iones Cl^- (35.5 g) hacia el ánodo.

Por lo tanto, la ley de Faraday es indispensable para conocer la cantidad de corriente que se requiere para transferir una cantidad específica de sales, en un sistema de ED. El modelo matemático que se emplea para realizar los cálculos al momento de dimensionar la planta es:

$$I = \frac{F^* \times F_d \times \Delta N}{e \times N^*} \tag{3.19}$$

donde:

I = Corriente continua, en [A].

F* = Constante de Faraday (96,500 [As] equivalente).

F_d = Flujo de agua desmineralizada en la pila, en [l/s].

ΔN = Cambio en la normalidad del flujo desmineralizado entre la salida y la entrada de la pila de membranas.

e = Rendimiento de la corriente.

N* = Número de pares de células.

Las pilas de membranas comerciales por lo regular presentan un rendimiento mínimo del 88%, para aplicaciones con aguas salobres. Es decir, de la corriente que se le aplica al sistema, solo el 88% se emplea en transferir iones del flujo de destilado al flujo de concentrado y el 12% restante son pérdidas, de entre las cuales destacan:

- Fugas cruzadas.
- Fugas directas a través del colector.
- Retrodifusión.
- Disipación por calor.
- Membranas no 100% selectivas.
- Membranas no 100% impermeables.
- Polarización.
- Quemaduras (corrientes horizontales).
- Contrapotenciales por diferencia de concentración.

Cuando no se conoce el porcentaje del rendimiento de la corriente que se está utilizando en la transferencia de sales en la pila de membranas, se puede calcular el dato, con base en los reportes de las lecturas de medición del sistema y despejando el rendimiento de la corriente de la ecuación anterior, de donde se obtiene que:

$$e = \frac{F^* \times F_d \times \Delta N \times 100}{I \times N^*} \tag{3.20}$$

Tabla 3.2.

Ejemplo de reporte de las lecturas de medición de una planta de electrodiálisis.

Reporte de las lecturas de medición de un sistema de ED:
Agua de alimentación: 0.0480 N (2805 ppm)
Agua producto: 0.0078 N (456 ppm)
Caudal de diluido (F _d): 9,765 l/h
Amperímetro (I): 25.5 A
Pares de células (N*): 450
Constante de Faraday (F*): 26.8 Ah

Por ejemplo, considerando los datos de la tabla 3.2. se estima el rendimiento de la corriente para ese sistema de la siguiente manera:

Se calcula la diferencia entre las concentraciones de alimentación y producto:

$$\Delta N = 0.0480 - 0.0078 = 0.0402$$

Una vez conocidas todas las incógnitas de la ecuación 3.20 se sustituyen y se obtiene que:

$$e = \frac{26.8 \times 9,765 \times 0.0402 \times 100}{25.5 \times 450} = 91.68\%$$

LEY DE OHM.- Indica que el potencial de un sistema eléctrico es igual al producto de la corriente por la resistencia del sistema, es decir:

$$E = I \times R^* \quad (3.21)$$

donde:

E = Potencial del sistema eléctrico, en [V].

I = Corriente del sistema, en [A].

R* = Resistencia del sistema, en [Ω].

Para calcular los requerimientos de voltaje que se presentaran en un sistema que se desea construir, se calcula la corriente mediante la ley de Faraday y la resistencia es determinada por los componentes que integran la pila de membranas y las características del agua que alimentara la planta. Para conocer la resistencia de la pila de membranas se tiene la siguiente ecuación:

$$R_{cp} = R_{cm} + R_{am} + R_c + R_d \quad (3.22)$$

donde:

R_{cp} = Resistencia de un par de células.

R_{cm} = Resistencia de la membrana catiónica.

R_{am} = Resistencia de la membrana aniónica.

R_c = Resistencia del concentrado.

R_d = Resistencia del desmineralizado.

Todas las resistencias se miden por unidad de área y se expresan en [$\frac{\Omega}{cm^2}$].

Diversos factores afectan la resistencia de las pilas de membranas, los principales de ellos son; la temperatura y la concentración de la solución y el tipo de iones que la conforma, los efectos que se presentan al variar estos factores son:

- A mayor concentración y temperatura de la solución, la resistencia de la solución disminuye y en consecuencia la resistencia de la pila de membranas también disminuye. Generalmente, por cada grado centígrado que varía la temperatura, se genera un cambio aproximado del 2% en la resistencia de la pila de membranas.
- Cuando los porcentajes de Na⁺ y Cl⁻ aumentan, la resistencia de la pila de membranas disminuye.

3.2.1. Parámetros de diseño

El diseño de una planta de electrodiálisis se basa principalmente en las especificaciones de la calidad del agua que alimentara a la planta y las características que se desean obtener en el destilado producido. Adicional a esto, existen diversos parámetros que limitan el diseño de las plantas de ED, los más importantes que se deben de considerar son los siguientes:

LA DENSIDAD DE CORRIENTE LIMITE (POLARIZACIÓN).- Al igual que en todos los procesos de desalación que se han tratado en este trabajo, en la ED la desalación no se realiza en una sola etapa, por lo general, se emplean entre 1 y 3 etapas, por motivos económicos (la remoción máxima de sales por etapa es de entre 40-50%). La densidad de corriente límite se obtiene al aumentar dicha corriente hasta un valor que iguale al número de iones equivalentes que pueden ser transferidos. Este límite está en función de la temperatura y velocidad del fluido a desalar, así como del tipo de iones que en él se presenten y se expresa usualmente como: $(DC/Nd)_{lim}$; donde DC es la densidad de corriente (cantidad de corriente transportada por unidad de área de la superficie de membrana) y Nd es la normalidad del flujo del destilado.

Al aumentar la densidad de corriente, la capa de solución próxima a la membrana llega a perder tantos iones que la resistencia eléctrica se incrementa rápidamente. Este incremento en la resistencia repercute en un aumento de voltaje que, al momento de exceder el voltaje de ruptura para las moléculas de agua, causa su disociación y forma iones de hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). Cuando la disociación de moléculas de agua se produce, se ha alcanzado el punto de “polarización”. Una elevada polarización en una membrana de transferencia aniónica, ocasiona que los iones hidroxilos sean transferidos a la corriente de concentrado, haciéndola alcalina. Los iones de hidrógeno remanentes en la célula desmineralizadora, que proceden del agua disociada, dan lugar a una disminución del pH en el flujo del destilado producido. En las membranas catiónicas, la polarización origina una transferencia de iones de hidrógeno al flujo de concentrado, disminuyendo su pH y aumentando el pH del flujo del destilado producido.

La generación de una polarización significativa, repercute en el proceso de ED de la siguiente forma:

- La resistencia del par de células aumenta, aumentando también el consumo de energía.
- El rendimiento de la corriente disminuye, debido a que la transferencia de iones de hidrógeno y/o hidroxilos, no es el resultado deseado del proceso de ED.

En los sistemas comerciales de ED se emplea un límite máximo de la densidad de corriente del 70% con la finalidad de asegurar una buena eficiencia del sistema.

FUGAS DE CORRIENTE (QUEMADURAS).- En los procesos de ED también existe un límite en el voltaje que se le puede aplicar al sistema, el cual está en función de la temperatura del agua de alimentación, las concentraciones de los flujos, el tamaño de la membrana y de la sección interior del colector. Al sobrepasar este límite, un exceso de corriente eléctrica traspasara de forma horizontal a la membrana, adyacente al colector de flujo de concentrado, desde el

electrodo, ocasionando daños por quemaduras en algunas membranas y espaciadores debido al calor que se genera.

Al momento de diseñar una planta de ED se debe de limitar la tensión aplicada a la pila de membranas al 80% del valor del voltaje límite.

RETRODIFUSIÓN.- La retrodifusión se presenta cuando la concentración de iones en el flujo del concentrado es mucho más elevada que la concentración de iones en el flujo del destilado. Debido a esto, algunos iones regresan a través de la membrana del flujo del concentrado hacia el flujo del destilado, moviéndose en contra de la fuerza que ejerce la tensión de CC. Este fenómeno se debe de considerar al momento de diseñar una planta de ED tomando en cuenta que, por lo general, el rendimiento de las membranas disminuye cuando la proporción entre las concentraciones es igual o mayor a 150:1.

ÍNDICE DE LANGELIER (IL).- La acumulación de iones de Ca^{++} , HCO_3^- y los sólidos totales disueltos en el flujo de concentrado, como resultado del proceso de desalación del destilado, pueden generar incrustaciones de carbonato de calcio (CaCO_3). El índice de Langelier indica la tendencia que se presenta en el agua con respecto al CaCO_3 :

- Si el índice es igual 0: el agua está perfectamente equilibrada. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
- Si el índice es negativo: indica que el agua es corrosiva y se clasifica como agua no saturada con respecto al CaCO_3 con la tendencia de eliminar láminas de CaCO_3 presentes en algunas tuberías y equipos con la finalidad de protegerlos.
- Si el índice es positivo: indica que el agua es incrustante se trata como agua sobresaturada con respecto al CaCO_3 . Hay posibilidad de formación de incrustaciones.

Algunos sistemas de ED que emplean inversores de polaridad para controlar la formación de incrustaciones, pueden operar con valores del IL de hasta +2.1. La disminución del porcentaje de sales extraídas o la disminución del porcentaje de agua recuperada puede favorecer a la disminución del IL. También puede disminuirse el IL al aplicarse pretratamientos al agua de alimentación para eliminar los iones Ca^{++} y Mg^{++} o mediante la inyección química de ácido en el flujo de concentrado

SATURACIÓN DE SULFATO DE CALCIO.- Para evitar la formación y precipitación del sulfato de calcio (CaSO_4) se debe de limitar la concentración de calcio y de sulfato en el flujo de concentración. La saturación de CaSO_4 se puede reducir con las mismas técnicas que se emplean para disminuir el IL.

Para el diseño de los sistemas comerciales de electrodiálisis con inversor de polaridad, el límite superior de la saturación de CaSO_4 es de 175% para los equipos sin pretratamiento químico y de hasta 300% para los equipos que si cuentan con pretratamiento químico.

3.2.2. Sistemas de electrodiálisis

El primer sistema de ED que se desarrolló de manera comercial, se denominó sistema de lotes, en el cual el agua de alimentación es obtenida de un tanque desde el cual se recircula a través de la única pila de membranas con la que cuenta el sistema, hasta que se consigue la pureza deseada en el destilado final. Sus niveles de producción dependen de la concentración de minerales que contenga el agua de alimentación y del grado de pureza que se desea obtener en el destilado.

En la figura 3.7, se puede apreciar el diagrama de flujo de un sistema de ED de bloques en el cual se muestran dos flujos principales que circulan en paralelo a través de la pila de membranas, uno de estos flujos es el de la salmuera de rechazo y el otro es el del destilado producto, mismo que es extraído del sistema, mediante una bomba hidráulica, al conseguirse la calidad deseada en el destilado. Para controlar la concentración de minerales en la salmuera que se recircula y prevenir incrustaciones en la pila de membranas, se desecha continuamente una fracción de este flujo y se ingresa una aportación del agua de alimentación.

En el mismo diagrama se observan otro par de flujos, los cuales representan los flujos de electrodos, que se encargan de adicionar de manera continua ácido al flujo del cátodo para evitar la formación de incrustaciones en el compartimento del electrodo.

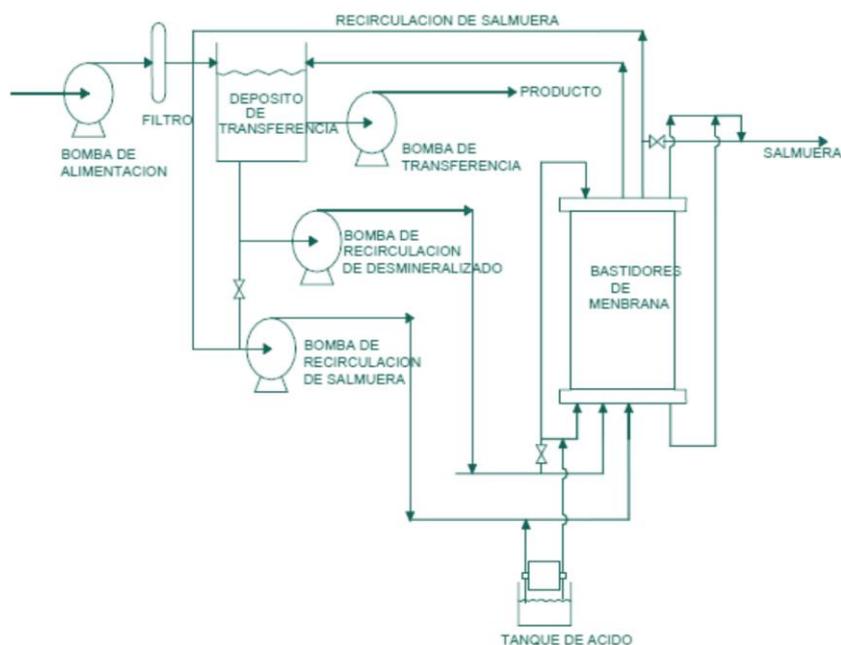


Figura 3.7. Diagrama de flujo de un sistema de ED de bloques.

3.2.3. Electrodiálisis continua

El segundo modelo de sistema de ED que se desarrolló fue de tipo continuo unidireccional, en el cual se cuenta con dos etapas en la pila de membranas internamente conectadas de tal forma que los dos flujos pasan, en una primera etapa, a través de la mitad inferior de la pila de membranas y posteriormente, en una segunda etapa, por la parte superior de la pila. En este tipo

de sistemas, se pueden generar más de dos etapas en una sola pila o instalarse en serie dos o más pilas de membranas (Pérez, 2013).

El flujo del agua desmineralizada hace un solo recorrido a través de las membranas para salir como destilado producto. El flujo de salmuera concentrada es reciclado parcialmente, para reducir la cantidad de salmuera de deshecho, y se le adicionan ácido y otros agentes químicos para evitar la generación de incrustaciones en las membranas.

En el diagrama de la figura 3.8 se aprecia una pila de membranas, en la cual se desarrollan dos etapas de filtración. Los dos cátodos se instalan en la parte baja y alta de la pila, mientras que el par de ánodos se instalan en los lados opuestos de un bloque de plástico que se instala en el centro de la pila. Los cátodos se elaboran de algún metal inerte (generalmente acero inoxidable) siendo alimentados en serie y en el cátodo que se encuentra en la parte inferior de la pila se instala una línea de alimentación proveniente de la bomba de alimentación.

Los ánodos, fabricados generalmente de titanio recubierto de platino o niobio, también se alimentan en serie. El ánodo de la primera etapa, se alimenta del flujo de concentrado que se encuentra en el interior de la pila y está interconectado al ánodo de la segunda etapa, a través del bloque de plástico central.

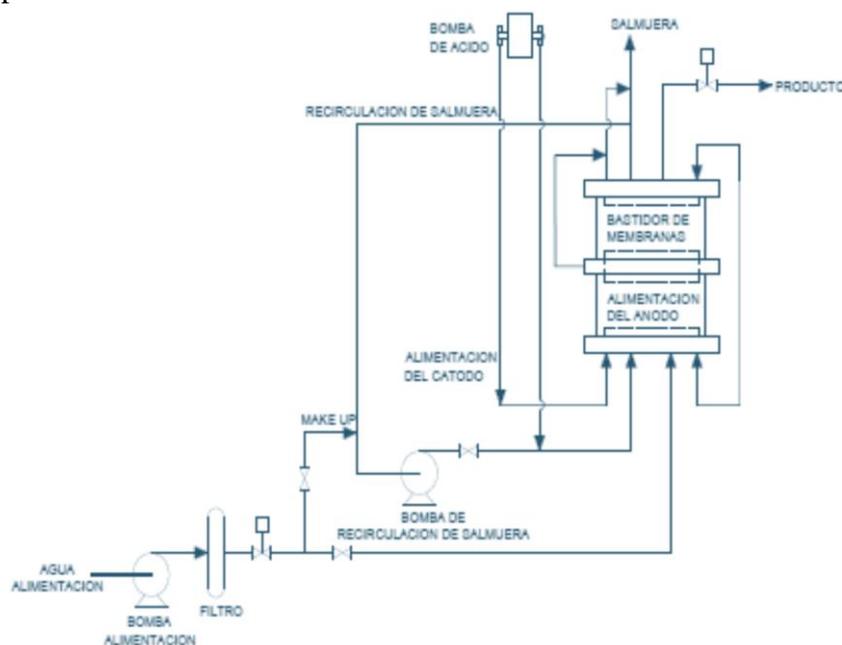


Figura 3.8. Diagrama de flujo de un sistema de ED unidireccional.

3.2.4. Limitaciones de los sistemas de electrodiálisis unidireccional

Los dos primeros modelos de sistemas de ED que se desarrollaron son del tipo unidireccional, lo cual indica que los iones que contiene el agua a desalar, solo se mueven en una dirección, los cationes son atraídos por el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Estos sistemas requieren de tratamientos químicos para evitar la generación de partículas coloidales e incrustaciones sobre las membranas pudiendo generar obstrucciones y decrementos en su eficiencia.

El debido manejo de los materiales extraños y las incrustaciones en los sistemas de desalación unidireccional son de gran importancia. El costo de operación e instalación de los tratamientos químicos que emplean ácidos fuertes u otros productos químicos son muy elevados, principalmente en áreas remotas donde no se cuenta con los insumos necesarios. Estas complicaciones repercuten directamente en el costo de operación y mantenimiento de la planta.

3.2.5. Electrodialísis reversible

Para subsanar el problema de la adición constante de productos químicos en los procesos de ED unidireccional, se desarrolló un modelo alternativo denominado electrodialísis reversible (EDR), este tipo de sistemas emplea un inversor de polaridad eléctrica con el cual se controlan continuamente las incrustaciones y la suciedad que se generan en las membranas sin la necesidad de la implementación de tratamientos químicos.

Con la implementación de los inversores, se logra invertir la polaridad de los electrodos 3 o 4 veces cada hora, por lo general se realiza de manera automática cada 15 min., con lo que se genera que el movimiento de los iones cambie de dirección dentro de la pila de membranas, evitando la formación de incrustaciones y de la película de suciedad que tiende a formarse sobre de ellas, en los sistemas unidireccionales.

En los esquemas que se muestran en la figura 3.9, se puede apreciar el cambio de dirección en el movimiento de los iones, al invertir la polaridad de los electrodos, debido a esto los compartimientos que en un principio contenían al flujo desmineralizado se transforman en compartimientos de flujo concentrado, y viceversa, del mismo modo, las válvulas cambian automáticamente los flujos de entrada y salida para que el agua de alimentación que entra al sistema fluya por los nuevos compartimientos de desmineralizado y el flujo de concentrado fluya dentro de los nuevos compartimientos de concentrado. Debido a esto, durante un breve periodo, el flujo desmineralizado, que se convertirá en el destilado producto, contiene una salinidad mayor a la que se desea obtener. A este flujo se le conoce como producto fuera de norma o producto fuera de especificaciones (Pérez, 2013).

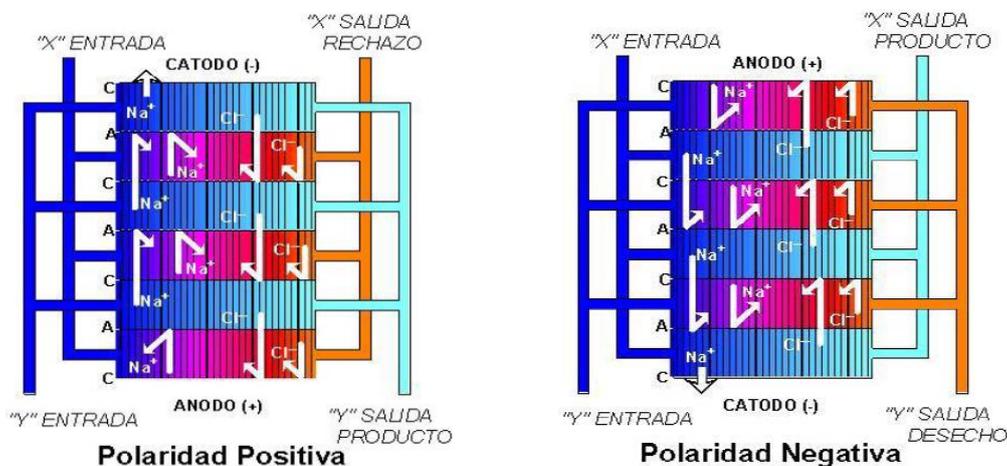


Figura 3.9. Esquemas de los efectos que se generan al invertir la polaridad de los electrodos en una pila de membranas.
 Fuente: <http://www.desalacion.org/wp-content/uploads/2013/08/TECNOLOGI%CC%81A-EDR-v.2.pdf>

Debido a que ningún compartimiento dentro de la pila de membranas se expone, por más de 15 o 20 min., a altas concentraciones de salinidad, en los sistemas de EDR, cualquier formación de sales es disuelta y extraída del sistema a la brevedad. En la figura 3.10 se puede apreciar el diagrama básico de una planta de EDR.

En los compartimentos que contienen los electrodos, las reacciones químicas se invierten al mismo tiempo que se invierte la polaridad, trayendo como ventaja que la acidez que se forma cerca del ánodo, la cual ayuda a prevenir las incrustaciones, se produzca alternadamente en los dos electrodos. Para conseguir los máximos beneficios de esta acidez, permitiendo el aumento en la concentración de iones H^+ y la reducción del pH, se puede operar el compartimento del ánodo en condiciones de “no-flujo”. Sin embargo, al mismo tiempo que esto pasa se generan gases de cloro y oxígeno, los cuales tienden formar una capa sobre el electrodo, llamada cubierta de gas. La formación de la cubierta de gas ocasiona un aumento considerablemente en la resistencia del electrodo.

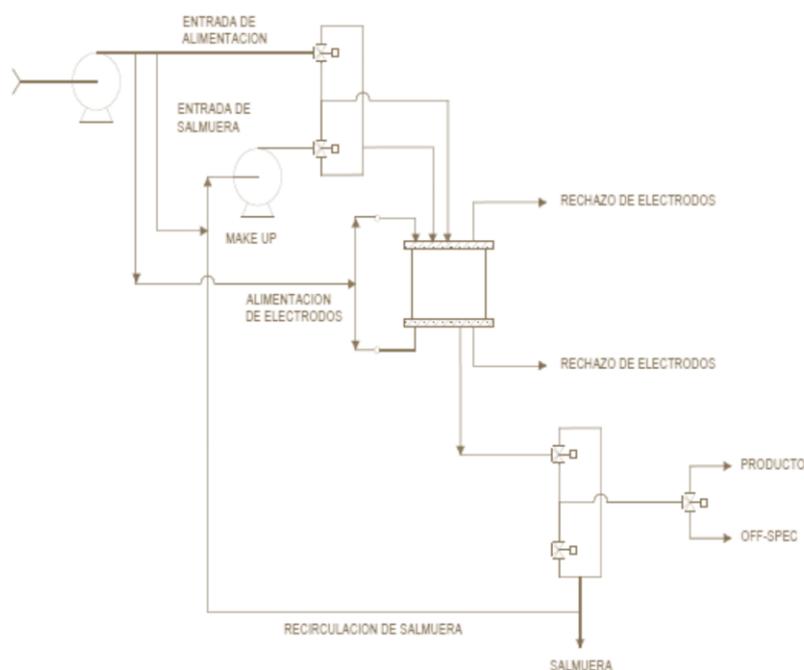


Figura 3.10. Diagrama de flujo de un sistema básico de EDR.

Para desintegrar la cubierta de gas se deben desalojar los gases del flujo del ánodo, por lo que se debe permitir que fluyan por un breve periodo, a esta acción se le conoce como “barrido”. Cuando el ánodo está en modo barrido, el agua en el cátodo debe fluir continuamente para reducir la concentración de OH^- , debido a que la alcalinidad aumenta la formación de incrustaciones. Debido a que los electrodos operan el 50% del tiempo en modo de ánodos, se deben construir de titanio con un recubrimiento de platino y deben de instalarse electroválvulas en los compartimentos que contienen a los electrodos para controlar de manera automática los flujos de los mismos.

Las principales ventajas que presentan los sistemas de EDR sobre la pila de membranas, en comparativa de los sistemas de ED unidireccional, son:

- Al invertirse la polaridad 3 o 4 veces por hora, se reduce el riesgo de que se genere polarización y formación de incrustaciones.
- En dado caso que se comiencen a formar incrustaciones, estas se eliminan rápidamente antes de que puedan crecer y generar alguna problemática.
- Con la inversión eléctrica del movimiento de las partículas coloidales, se reduce casi en su totalidad la formación de suciedad o alguna otra sustancia similar sobre la superficie de las membranas.
- Al no requerir de la adición de ácidos o algún otro producto químico, previo o durante el proceso, se eliminan los problemas y costos que de ello se derivan.
- La formación de ácido en los electrodos, durante su etapa anódica, propicia que en ellos se realice una autolimpieza.

4. CARACTERÍSTICAS DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES: SOLAR, EÓLICA, GEOTÉRMICA Y BIOMASA

Las fuentes de energía son los recursos existentes en la naturaleza que pueden ser empleados por la humanidad para cubrir sus requerimientos energéticos.

El Sol es el origen de casi todas las fuentes de energía, pudiéndolas clasificar en dos grandes categorías; las energías convencionales, o no renovables, y las renovables. Las energías no renovables son aquellas que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas y, una vez que han sido empleadas en su totalidad, no pueden regenerarse de manera natural o artificial, debido a que no existen métodos viables de producción o de extracción; el petróleo, el gas natural y el carbón son algunos ejemplos de este tipo de energías. En contraparte se encuentran las energías renovables (ER), también conocidas como energías limpias, que se obtienen de la naturaleza de manera teóricamente infinita y pueden regenerarse de forma natural, no producen gases de efecto invernadero (GEI) ni otras emisiones dañinas para el medio ambiente como el CO₂, y cuya principal desventaja es la intermitencia de la producción en algunas de ellas, así como los altos costos de inversión inicial, en comparativa con las energías convencionales. En esta categoría se encuentra las energías: solar, eólica, geotérmica y biomasa, entre otras. A continuación, se describen brevemente los cuatro tipos de ER que más se emplean actualmente.

4.1. Energía solar

Mediante un proceso de conversión, a electricidad o calor, es posible aprovechar la radiación proveniente del Sol; otra forma de aprovechar esta energía es de una forma pasiva haciendo uso de la iluminación natural y las condiciones climatológicas de cada región para climatizar adecuadamente las edificaciones, mediante lo que se denomina arquitectura bioclimática.

El Sol es la estrella más próxima a nuestro planeta, ocupa la posición central en el sistema solar y está formado por 73.46% de hidrógeno, 24.85% de helio, 0.77% de oxígeno y 0.29% de carbono y otros componentes. La energía solar, procede de la fusión nuclear que se produce en su interior como consecuencia de los componentes que lo forman. La materia se convierte así en energía en forma de radiación electromagnética, la cual tarda 8 minutos en llegar a la Tierra, su espectro y distribución se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1.
Espectro y distribución de la radiación solar.

Franja	Longitud de onda, μm
Infrarrojo	<0.38
Visible	0.38-0.78
Ultravioleta	>0.78

Fuente: Duffie, J. y William, B. "Solar engineering of thermal processes".

La distancia media entre la Tierra y el Sol es de 149.5 millones de kilómetros, considerando que la cantidad de energía que éste irradia en todas direcciones es de $4 \times 10^{26} \text{ J/s}$ y que la Tierra gira en torno al Sol de manera elíptica, se puede conocer la cantidad de radiación solar que incide en un metro cuadrado. Este valor es conocido como la constante solar (G_{sc}) y su magnitud es de $1,367 \text{ W/m}^2$, en el exterior de la atmosfera terrestre (masa de aire cero) (Duffie, 2013). Si se toma en cuenta las distorsiones que sufre la radiación solar ocasionadas por los gases, el polvo y las nubes al momento de atravesar la atmosfera y por la reflexión de las nubes hacia el exterior, la constante solar, a nivel del mar (masa de aire 1) y con cielo totalmente despejado es de aproximadamente 1 kW/m^2 .

El aprovechamiento de la energía solar de manera activa, requiere de la implementación de dispositivos mediante los cuales se capta la energía proveniente del Sol para convertirla de forma congruente con la demanda energética que se desee satisfacer. La transformación a la que es sometida la energía solar se clasifica en dos categorías: fotovoltaica y fototérmica.

4.1.1. Energía solar fotovoltaica

Los equipos fotovoltaicos convierten directamente la radiación solar en electricidad. Esto se consigue gracias al efecto fotovoltaico, empleando celdas fotovoltaicas, las cuales son semiconductores sensibles a la luz solar; de tal forma que cuando en ellas incide la radiación, los electrones de valencia se separan de los átomos del material semiconductor, produciendo en la celda una transferencia de corriente eléctrica entre sus dos caras (MinE, 2008), ver figura 4.1.

Los sistemas fotovoltaicos pueden instalarse de dos formas: interconectadas a la red eléctrica o aisladas (no conectadas a la red). Con base en el tipo de instalación que se lleve a cabo y a sus características, se calculan los componentes del sistema, siendo los principales elementos los siguientes:

CELDAS FOTOVOLTAICAS. - Se encargan de la conversión fotovoltaica, por lo general se fabrican de silicio cristalino. Al momento de incidir la radiación solar sobre la superficie de la celda se

crea una diferencia de potencial y una corriente eléctrica aprovechable. A partir de la década de los 50's las celdas fotovoltaicas comenzaron a implementarse en aplicaciones espaciales para abastecer de energía a los satélites.

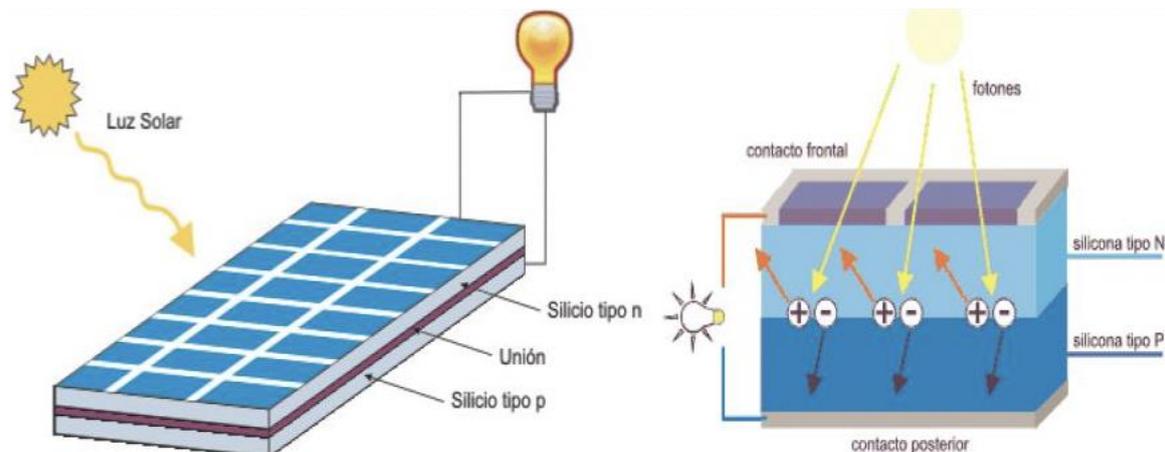


Figura 4.1. Esquema de las regiones semiconductoras de una celda solar y conducción eléctrica con luz incidente.

Fuente: <http://fuentesdeenergia.wordpress.com/page/2/>

PANELES FOTOVOLTAICOS.- Se forman agrupando un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí, generando la electricidad en corriente continua. Al momento de ser instalados, estos paneles deben de orientarse de manera correcta considerando las coordenadas del sitio donde se desean instalar, para conseguir un óptimo aprovechamiento.

REGULADOR DE CARGA.- Es el encargado de proteger de una sobrecarga o descarga a las baterías del sistema. También se utiliza para regular las cargas en condiciones de operación extremas y brindar información al operador del sistema.

BATERÍAS.- Son dispositivos capaces de transformar energía potencial química en energía eléctrica y viceversa, en ellas se almacena la energía eléctrica generada por los paneles solares. Están compuestas por un par de electrodos sumergidos en un electrolito donde se producen las reacciones químicas en los procesos de carga (durante el día) y descarga (durante la noche). En las instalaciones fotovoltaicas se recomienda utilizar baterías de ciclo profundo elaboradas de iones de litio con hierro (LiFe-ion).

INVERSOR DE CORRIENTE.- Es un dispositivo capaz de modificar las características del voltaje y la corriente que recibe, transformándola de manera óptima dependiendo de los usos específicos de implementación. Se usan principalmente para transformar la corriente continua, generada por las celdas fotovoltaicas y acumulada en las baterías, a corriente alterna.

Los elementos que se emplean en las instalaciones conectadas a red así como en las no conectadas, son esencialmente los mismos, con la principal diferencia que en las instalaciones conectadas a red no se precisa de la acumulación de energía por lo tanto no es necesario la instalación de las baterías ni del regulador, además de que las características del inversor de corriente también cambian.

Actualmente, los equipos fotovoltaicos se implementen en prácticamente cualquier lugar, debido a que sus costos han disminuido considerablemente en los últimos años.

Sus principales ventajas son:

- Evita los costos económicos, ecológicos y estéticos de la instalación y mantenimiento de la red eléctrica en zonas de difícil acceso.
- Es una energía descentralizada que puede ser captada y utilizada en cualquier sitio que cuente con un adecuado potencial de radiación solar.
- Una vez instalados los equipos, tienen un costo energético nulo.
- El mantenimiento y el riesgo de averías son muy bajos.
- Su instalación es fácilmente modulable, por lo cual, se puede aumentar o reducir la potencia instalada fácilmente según las necesidades energéticas.
- Durante su operación, no se produce contaminación alguna.
- Es una tecnología en desarrollo que tiende a continuar reduciendo sus costos y aumentando su eficiencia, la cual actualmente no sobrepasa del 15%.

4.1.2. Energía solar térmica

Los equipos fototérmicos, transforman la radiación solar en energía térmica. Esos equipos se conforman esencialmente de colectores o concentradores solares, intercambiadores de calor y equipos de almacenamiento térmico.

En las configuraciones más básicas, dentro de los colectores circula un fluido caloportador encargado de absorber la energía térmica y transferirla en los intercambiadores de calor. Este fluido puede ser agua, algunos glicoles y aceites de silicona entre otros.

Las instalaciones termosolares se pueden clasificar de acuerdo con los rangos de su temperatura de aprovechamiento en (Estrada, 2010):

- Baja. Hasta 100 °C.
- Media. Desde 100 °C y hasta 400 °C.
- Alta. Mayores a 400 °C.

En la figura 4.2 se pueden apreciar algunos ejemplos de diferentes equipos termosolares de baja, media y alta temperatura.

Los equipos catalogados de baja temperatura se emplean generalmente para obtener agua caliente con fines sanitarios y para la climatización de espacios. Esta categoría comprende los dispositivos para calentar agua y aire a presión atmosférica, su diseño y operación son relativamente sencillos, ejemplos de ellos son los calentadores de agua para uso doméstico, secadores, destiladores y estanques.

Los equipos de media y alta temperatura se emplean para calentar agua y aire a presiones mayores a la atmosférica, aunque existen fluidos que hierven a medianas y altas temperaturas

a presión atmosférica. En estos casos, se requiere la implementación de concentradores de la irradiación, por lo que su diseño y operación resultan más complejos (Estrada, 2010).

En las aplicaciones de mediana temperatura, normalmente se emplean colectores de tipo parabólico, los cuales concentran la radiación solar en un tubo colector encargado de recibir y transferir el calor. Los sistemas de alta temperatura comprenden grandes instalaciones de concentración solar ya sean tipo Fresnel, discos, canales parabólicos o campos de helióstatos que por lo regular concentran la radiación solar en una torre central, estos sistemas cuentan comúnmente con una caldera central para la producción de vapor a alta temperatura para procesos térmicos industriales o para producción de electricidad. En los casos de los equipos de muy altas temperaturas, como los hornos solares, la irradiación concentrada se usa directamente en procesos de metalurgia.

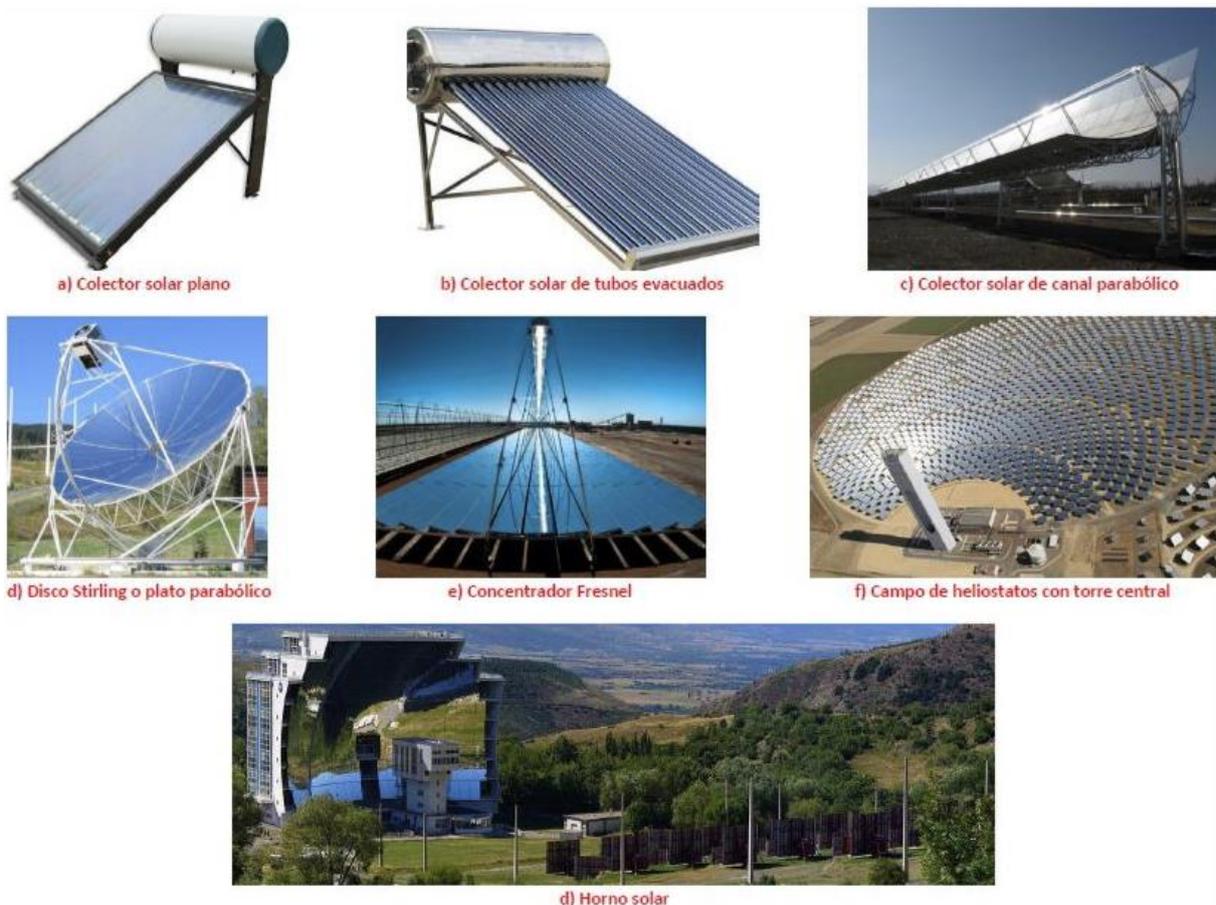


Figura 4.2. Diferentes tipos de concentradores solares.

Fuente: <http://www.unida.org.ar/Virtuales/Energias/Clase%204/CONCENTRADORES%20SOLARES.pdf/>

En cualquiera de las aplicaciones de la energía solar térmica se pueden usar equipos de almacenamiento térmico para operar los sistemas de manera más adecuada.

Aún con la gran cantidad de diferencias que presentan los distintos tipos de captadores solares, el parámetro principal que se emplea para su caracterización es la curva de rendimiento, ver figura 4.3. El rendimiento de un captador solar es la relación que existe entre la cantidad de energía solar que incide en la superficie del captador y la cantidad de energía útil que se

transmite al fluido caloportador. Las principales variables que inciden en el rendimiento de un captador solar son: la radiación del lugar donde se lleva a cabo la instalación, la temperatura del fluido caloportador, la temperatura ambiente y las características de los materiales empleados en su construcción (Solverde, 2011).

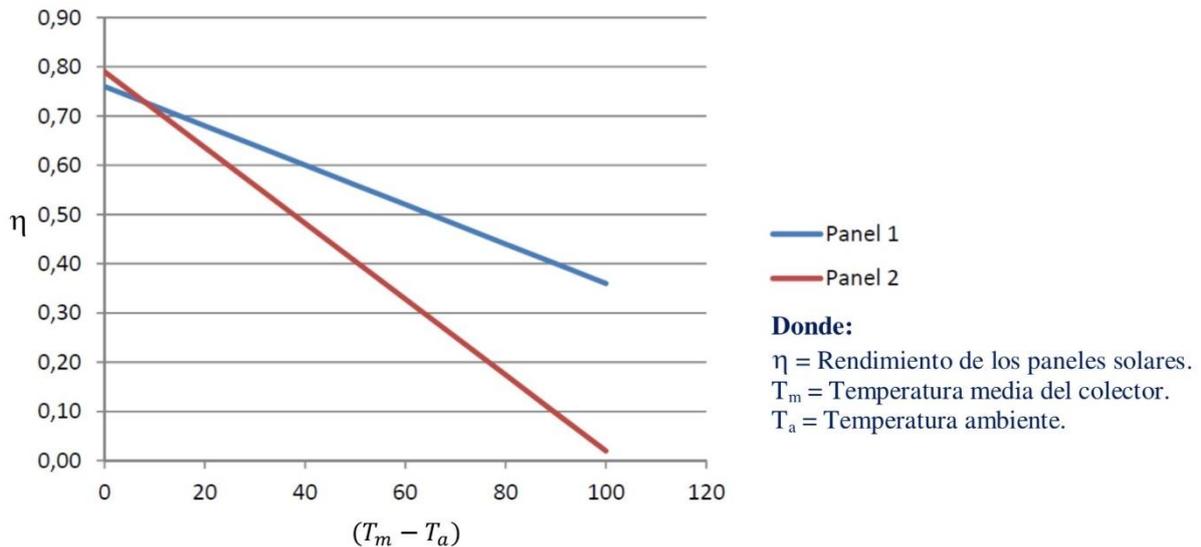


Figura 4.3. Ejemplo de las curvas de rendimiento de distintos colectores solares.
Fuente: <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/paneles-solares-termicos-cual-elegimos/>

4.2. Energía eólica

El 2% de la energía que proviene del Sol es transformada a energía eólica. En función de la latitud, el Sol calienta de manera desigual la superficie de nuestro planeta, ocasionando diferencias de presión que los flujos de aire tienden a igualar, es decir, el viento es una consecuencia de la radiación solar que incide sobre la Tierra y que origina un calentamiento variable en las masas de aire que en ella circulan (Schallenberg, 2008).

Los equipos que emplean la energía eólica se basan en las tecnologías y aplicaciones que aprovechan la energía cinética del viento, convirtiéndola en un principio en energía mecánica para posteriormente, en caso de ser requerido, transformarla en energía eléctrica. Estos equipos se pueden clasificar, según su aplicación, en dos grandes grupos: los equipos que solo emplean la energía mecánica obtenida del viento, como lo son las instalaciones de bombeo de agua, y los equipos que emplean la energía del viento para la producción de electricidad. Al igual que con las instalaciones fotovoltaicas, las instalaciones eólicas productoras de electricidad se pueden subdividir en instalaciones aisladas no conectadas a la red eléctrica e instalaciones interconectadas a la red, conocidas como parques eólicos. Las instalaciones aisladas, cubren aplicaciones de pequeña demanda energética, mientras que, con las aplicaciones conectadas a la red eléctrica, es posible obtener un mayor aprovechamiento energético.

Se considera que el aprovechamiento de la energía contenida en el viento se remonta por lo menos a 3,000 años antes de la era cristiana, principalmente para la propulsión de navíos. En

Persia en el año 200 a.C. se desarrollaron los primeros molinos de viento para la trituration de granos y durante la edad Media la gama de aplicaciones para este tipo de energía se amplió a las industrias textil, metalúrgica y maderera, entre otras. Los primeros molinos eran muy rudimentarios y su diseño se basaba en la rotación de un eje instalado verticalmente; a partir del año 1350, en Holanda, se modificó esta tecnología y se comenzaron a implementar molinos con cuatro palas y eje horizontal. Los molinos de eje horizontal son los más empleados en la actualidad (MinE, 2008).

A principios del siglo XX se comenzaron a emplear los primeros aerogeneradores, para mediados de siglo la mayoría de los aerogeneradores que existían no excedían de los 3 kW de potencia. En EUA, durante la segunda guerra mundial, estuvo en funcionamiento un aerogenerador de 1,250 kW, para mediados de los años 60's se habían desarrollado diversos equipos en Dinamarca, Francia y los EUA capaces de generar más de 1,000 kW, pero la mayoría de estos equipos presentaron fallas que resultaron imposibles de resolver debido a su alto costo o los limitantes tecnológicos de la época. Debido a esto, aunado al bajo costo de los combustibles convencionales y al desinterés por el cuidado del medio ambiente, los aerogeneradores no tuvieron una buena aceptación en la industria energética.

En la década de los 70's se vivió una fuerte crisis energética, que detonó en el aumento del precio del petróleo y todos sus derivados, lo que originó en las grandes naciones un creciente interés por el desarrollo de las ER con la finalidad de disminuir su dependencia de los combustibles fósiles. Países como Alemania, EUA, Holanda, Dinamarca, España y China, entre muchos otros, comenzaron a realizar diversos proyectos con la finalidad de obtener una mejor tecnología que consiguiera utilizar el recurso eólico de una manera más eficiente.

En la actualidad, cada año se incrementa significativamente el potencial mundial de generación eólica, en la figura 4.4 se puede apreciar la capacidad mundial instalada y su crecimiento desde el año 2006 hasta el 2016 (REN21, 2017).

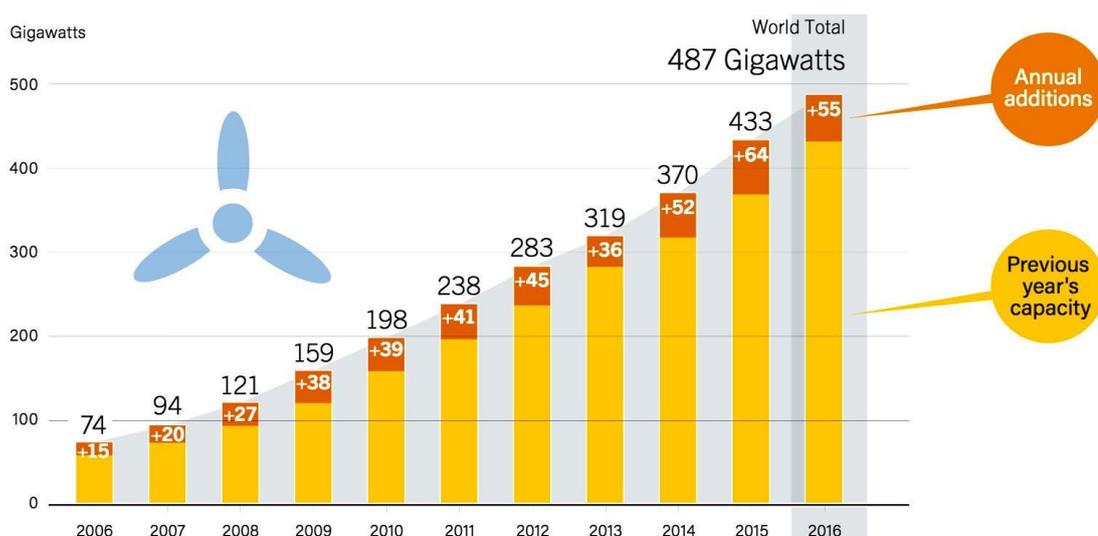


Figura 4.4. Capacidad mundial instalada de energía eólica-eléctrica y adiciones anuales [GW] de 2006 a 2016. Fuente: RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).

4.2.1. Aerogeneradores

Los equipos de aerogeneración, en su mayoría, comienzan a producir energía eléctrica a velocidades de viento superiores a los 4 m/s (15 km/h), se obtiene su potencia máxima en el rango de 12 a 15 m/s (40 a 55 km/h) y para evitar deterioros en sus componentes, es necesario sacarla de funcionamiento cuando la velocidad supera los 25 m/s (90 km/h). Actualmente se comercializan aerogeneradores de diferentes potencias que van desde 50 W hasta 8 MW. A diferencia de los molinos tradicionales, estos equipos emplean pocas palas, por lo general 3, para desarrollar una mayor eficiencia en la transformación de la energía contenida en el viento.

Se puede clasificar a los aerogeneradores según la posición de su eje en dos grandes grupos: los de eje vertical y los de eje horizontal, ambas configuraciones tienen aspectos a favor y en contra, pero actualmente más del 80% de aerogeneradores que se fabrican son de eje horizontal (MinE, 2008).

Los aerogeneradores de grandes dimensiones contienen más de 8,000 componentes distintos, pero los principales son; el rotor, la carcasa, la torre, el sistema de orientación, el sistema de transmisión, el sistema de seguridad, el generador eléctrico, el sistema de protección y control y las baterías de almacenamiento, en las instalaciones aisladas de red (ver figura 4.5). A continuación, se describe brevemente el funcionamiento de cada uno de ellos:

ROTOR.- Es la parte esencial para la conversión de energía, convierte la energía cinética del aire en energía mecánica rotacional. Está compuesto de las palas y el buje (elemento de sujeción de las aspas y conexión del eje del equipo). Los rotores se fabrican normalmente de compuestos de fibra de vidrio o plástico reforzado. Su diámetro determina la cantidad de energía que un aerogenerador produce y el “área de barrido” de la turbina.

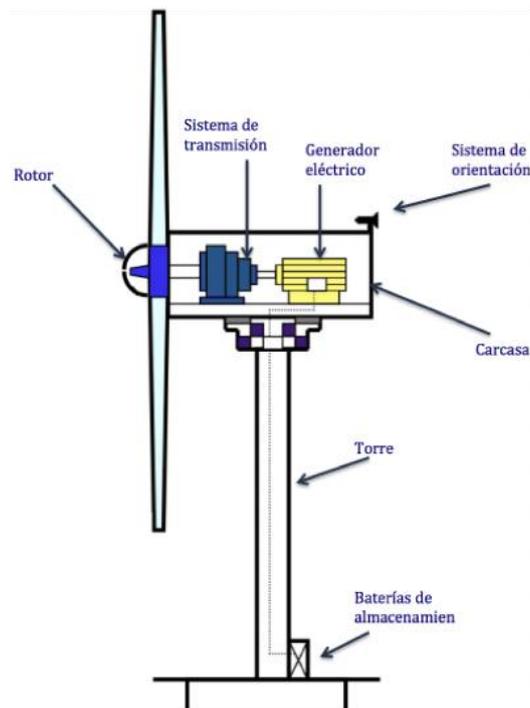


Figura 4.5. Principales componentes de un aerogenerador.

CARCASA O GÓNDOLA.- Es la cubierta encargada de proteger al generador eléctrico, al sistema de transmisión y demás componentes de las inclemencias del medio ambiente.

TORRE.- Se encarga de sostener la turbina, debe de resistir las inclemencias del medio ambiente como los rayos, vientos extremos, granizo, y formación de hielo. Las torres se pueden catalogar en dos principales grupos, las autosoportadas y las que mantienen su vertical con ayuda de otros elementos, por lo general cables de acero.

GENERADOR ELÉCTRICO.- Convierte la energía rotacional del eje de la turbina en electricidad, puede producir voltajes en corriente directa (CD) o corriente alterna (CA) con rangos desde los 12 a 24 voltios CD, para carga de baterías, o de 120 a 240 voltios CA para interconexión con la red eléctrica, en caso de ser necesario, se pueden conseguir otros voltajes.

SISTEMA DE TRANSMISIÓN.- Transfiere la energía rotacional suministrada por el rotor al generador eléctrico. En la aerogeneración de pequeña escala, se utiliza generadores de imanes permanentes especialmente diseñados para ser acoplados a los aerogeneradores, y por tanto no se utiliza una caja de aumento de velocidad de rotación, realizándose una conexión directa entre el rotor y el generador, pero en equipos eólicos de mayor capacidad, se requiere de un sistema de transmisión el cual se encarga de aumentar la energía generada por el rotor para hacer funcionar al generador eléctrico.

SISTEMA DE PROTECCIÓN Y CONTROL.- Estos sistemas abarcan desde fusibles, interruptores, y reguladores de carga para las baterías hasta sistemas computarizados de orientación, dependiendo de la aplicación de la turbina eólica y del sistema de energía que soporta.

SISTEMA DE ORIENTACIÓN.- Mantiene alineada la turbina con el viento. En los aerogeneradores de baja producción, se emplea una veleta que orienta el rotor hacia el viento. Existen mecanismos especiales para desorientar la turbina en caso de que el viento alcance altas velocidades.

SISTEMA DE SEGURIDAD.- Protege al aerogenerador de borrascas o incrementos excesivos en la velocidad del viento. En los pequeños aerogeneradores (de hasta 10 kW de potencia nominal), el sistema de seguridad está asociado con el sistema de orientación y se debe de instalar el eje vertical del rotor descentrado con respecto al eje central de la torre, en aerogeneradores de mayores potencias, el sistema de seguridad se conforma de controles electrónicos.

BATERÍAS DE ALMACENAMIENTO.- En las instalaciones aisladas se emplean acumuladores para almacenar la energía eléctrica producida, para emplearse en los momentos que no se cuente con el recurso eólico.

La mayor desventaja que presenta esta energía es que no en todas las partes del mundo puede ser implementado debido a que las características del viento no resultan lo suficientemente adecuadas, por su baja velocidad o por su intermitencia, impidiendo considerar esta tecnología como una opción viable para la generación de electricidad a gran escala, limitando su implementación a dispositivos de baja potencia.

En contraparte, las principales ventajas que tiene la energía eólica son las siguientes:

- Es un recurso inagotable.
- No genera contaminantes durante su implementación.
- Se obtiene de forma gratuita del medio ambiente.
- Se puede implementar de diversas formas dependiendo de las necesidades a cubrir.
- Tiene bajos costos de mantenimiento y una vida útil, de los equipos, superior a los 20 años.

4.3. Energía geotérmica

La energía geotérmica aprovecha el calor proveniente de la corteza terrestre transformándolo en energía térmica o eléctrica empleadas principalmente en procesos agrícolas o industriales.

Debido a una combinación de diversos fenómenos naturales, entre los que destacan la desintegración de elementos radiactivos de vida prolongada y los restos de material incandescente de los orígenes del planeta, en la Tierra se almacena una gran cantidad de energía en forma de calor (MinE, 2008).

De manera esquematizada, y considerando su composición química, se puede determinar que la estructura de la Tierra se conforma de tres capas concéntricas que van desde su superficie hasta su centro, el cual se encuentra a una profundidad media de 6,371 km, ver figura 4.6. Estas capas son:

- Corteza Terrestre. Su espesor llega hasta los 70 km y está constituida por rocas en estado sólido.
- Manto (superior e inferior). Con una profundidad que va de 70 a 2,900 km, está conformado por materiales en estado semifundido y representa el 80% del volumen terrestre.
- Núcleo. Es una región metálica sólida que representa aproximadamente el 15% del volumen terrestre, formado principalmente por hierro y níquel.

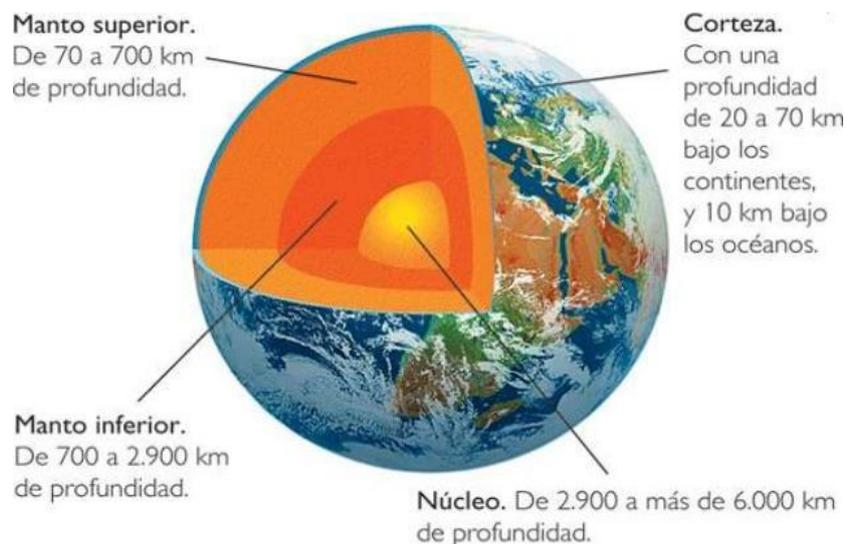


Figura 4.6. Modelo de las estructuras internas de la Tierra.

Fuente: <http://pllanos-geografia.blogspot.mx/2009/09/2-el-relieve-terrestre.html>

Los materiales del núcleo y el manto contienen una gran cantidad de energía calorífica, misma que transmiten gradualmente hacia la corteza generando un flujo de calor ascendente que después de atravesarla es disipado en la atmosfera. En la parte superior de la corteza, por cada 100 metros de profundidad la temperatura aumenta, por lo general, 3 °C. Este aumento de temperatura es conocido como gradiente geotérmico, el cual tiene normalmente un rango de aumento de temperatura de 2 a 5 °C por cada 100 metros de profundidad, en los casos en los que el aumento excede de los 5°C se considera que, en ese sitio, a una profundidad de 1,500 metros se tendrá una temperatura aproximada de 180 °C.

En los límites entre la corteza y el manto existen zonas que, debido a su configuración geológica, registran un gradiente geotérmico más elevado que en otras regiones, lo que significa que, a profundidades similares, las temperaturas de estas zonas son mayores que en su periferia. Estas regiones, denominadas calientes, se ubican por lo regular en el fondo de algunos océanos, en donde el espesor de la corteza es estrecho lo que facilita el ascenso del calor contenido en el manto provocando incluso erupciones submarinas de lava, y en zonas próximas a cordones montañosos, que coinciden habitualmente con bordes continentales de elevada actividad sísmica y/o volcánica (Llopis, 2008).

En ocasiones, los acuíferos que se encuentra o cruzan por zonas calientes, que por consecuencia presentan una elevada temperatura en el agua que contienen, coinciden con áreas de la corteza donde existen fisuras y grietas mediante las cuales el agua alcanza la superficie del terreno generando manantiales o vertientes. Si el gradiente geotérmico de estas zonas es lo suficientemente elevado, lo que ocasionaría que la temperatura del acuífero fuera también muy elevada, se genera lo que comúnmente se conoce como una manifestación hidrotermal.

Las manifestaciones hidrotermales presentan características muy distintas a los afloramientos comunes de agua. Están asociadas a las fases posteriores de procesos volcánicos y el fluido que emanan, además de ser expulsado a altas temperaturas está acompañado de gases, principalmente carbónicos y sulfuros, que produce un olor fétido. Debido a sus características se puede clasificar a las manifestaciones termales de la siguiente forma:

FUMAROLAS.- Son emisiones de vapores y gases a muy elevadas temperaturas, capaces de alcanzar los 500 °C. Se suelen subclasificar con base a su composición química en: clorhídricas, carbonatadas, sulfurosas, etc.

SOLFATARAS.- Son una variación de las fumarolas con una mayor cantidad de vapor de agua en sus emanaciones a una menor temperatura, inferior a los 200 °C. Las solfataras emiten intermitentemente chorros de vapor de agua acompañados de gas carbónico, hidrógeno sulfurado y otros gases. Tanto las fumarolas como las solfataras pueden presentarse de manera suave o abrupta, dependiendo de la presión a la que se encuentre el acuífero del cual provienen.

GÉISERES.- Son emanaciones de una mezcla de vapor y agua a temperaturas de entre 70 y 100 °C, con una gran cantidad de sales tanto disueltas como en suspensión, por lo que no presenta la presión suficiente para alcanzar continuamente la superficie del terreno. La precipitación y solidificación de las sales en torno al orificio de salida forma una especie de tapón el cual

provoca un aumento en la presión de la mezcla que, al momento de no poder ser contenida, origina la emanación de agua y vapor. Este proceso se desarrolla de manera cíclica con gran exactitud en sus intervalos entre cada erupción, los cuales pueden ir desde minutos hasta meses.



Figura 4.7. Ejemplos de: (a) Fumarolas, (b) Solfataras y (c) Géiser.
Fuente: <http://egresadoselectronicaunc.blogspot.mx/2012/09/manifestaciones-hidrotermales.html>

En la antigüedad el recurso geotérmico era utilizado por romanos y griegos, entre otros, únicamente como aguas termales con propiedades curativas. Actualmente este uso sigue teniendo mucho auge, generando así un aprovechamiento del recurso con fines ecoturísticos; en la minería también puede ser aprovechado al implementar sistemas para la recuperación de las sales disueltas que contienen las mezclas que se emanan, como lo son las sales de Litio, Cadmio y Boro, sin embargo, el aprovechamiento que más importancia se le puede brindar al recurso geotérmico es en procesos energéticos.

4.3.1. Obtención del recurso geotérmico

Al igual que en la obtención del petróleo, la explotación de un yacimiento geotérmico requiere en primer lugar de perforaciones de exploración para posteriormente instalar un cierto número de pozos de producción que le permitan al agua caliente o al vapor llegar desde el acuífero (reservorio) hasta la superficie. Para que el recurso geotérmico se pueda considerar como un recurso renovable, es necesario limitar la extracción de agua caliente o vapor de un yacimiento para evitar que sea mayor que la recarga natural de agua que abastece al acuífero.

Para determinar si una región puede proveer de manera eficiente el recurso geotérmico, es necesario desarrollar un proceso de exploración conformado por una sucesión de etapas en las cuales se elaboran diversos estudios geofísicos y geológicos los cuales aumentan gradualmente su complejidad, especificidad y costo de inversión. El área que se emplea durante este proceso, por lo general, sobre pasa de los 15,000 km², esta área se va reduciendo a medida que avanza el proceso, para culminar con un yacimiento cuya superficie oscila entre 10 y 100 km² (MinE, 2008).

El proceso de exploración consta de cinco etapas, cada una con estudios, tareas y objetivos específicos, los cuales se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2.
Etapas del proceso de exploración geotérmica.

	RECONOCIMIENTO Sup. > 10,000 km ²	PREFACTIBILIDAD Sup. de 500 a 2,000 km ²	FACTIBILIDAD Sup. de 10 a 15 km ²	DESARROLLO	EXPLOTACIÓN
Estudios o Tareas a realizar	Geología Geoquímica Hidrología	Geología Geoquímica Hidrogeología Geofísica Pozos someros	Pozos exploratorios Estudios de reservorios	Pozos de explotación Sistemas de conducción Diseño de la planta	Funcionamiento de la planta Control de campo
Objetivos buscados	Circunscribir las áreas con mejores posibilidades	Determinar el modelo geotérmico preliminar y seleccionar la ubicación de los pozos de exploración	Verificar las características del yacimiento y determinar la convivencia técnica y económica de su explotación	Crear las condiciones para una correcta explotación del yacimiento	

Es importante resaltar que conforme avanza en el proceso, los costos de inversión se incrementan sustancialmente, por lo que a medida que se obtienen los resultados de cada etapa, es necesario evaluar detenidamente que tan conveniente resulta seguir adelante con el proyecto.

Una vez obtenido el recurso geotérmico, existen básicamente dos métodos para su implementación:

USO DIRECTO DEL CALOR.- Puede ser empleado para diversos procesos agrícolas e industriales, así como para climatizar viviendas y edificaciones, ver figura 4.8.

GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD.- Con la ayuda de instalaciones termoeléctricas puede emplearse el vapor geotérmico para la generación de energía eléctrica, evitando de esta forma la quema de combustibles fósiles. Debido a que el vapor que se obtiene del recurso geotérmico se presenta mezclado con partículas de agua, es necesario realizar un proceso de separación para retirar dichas partículas antes de hacer ingresar el vapor a las turbinas.

En Larderello, Italia, se realizó en 1904 el primer experimento a nivel mundial para producir energía eléctrica empleando vapor geotérmico y fue ahí donde comenzó a operar la primera planta de 250 kW en 1913. Hasta finales de la década de los 50's Italia seguía siendo el único país donde se empleaba la energía geotérmica para la generación de energía eléctrica, desde entonces países como Nueva Zelanda, EUA, Japón, Indonesia y México, entre otros, comenzaron a utilizar el recurso geotérmico con este mismo fin (Cappetti, 2016).

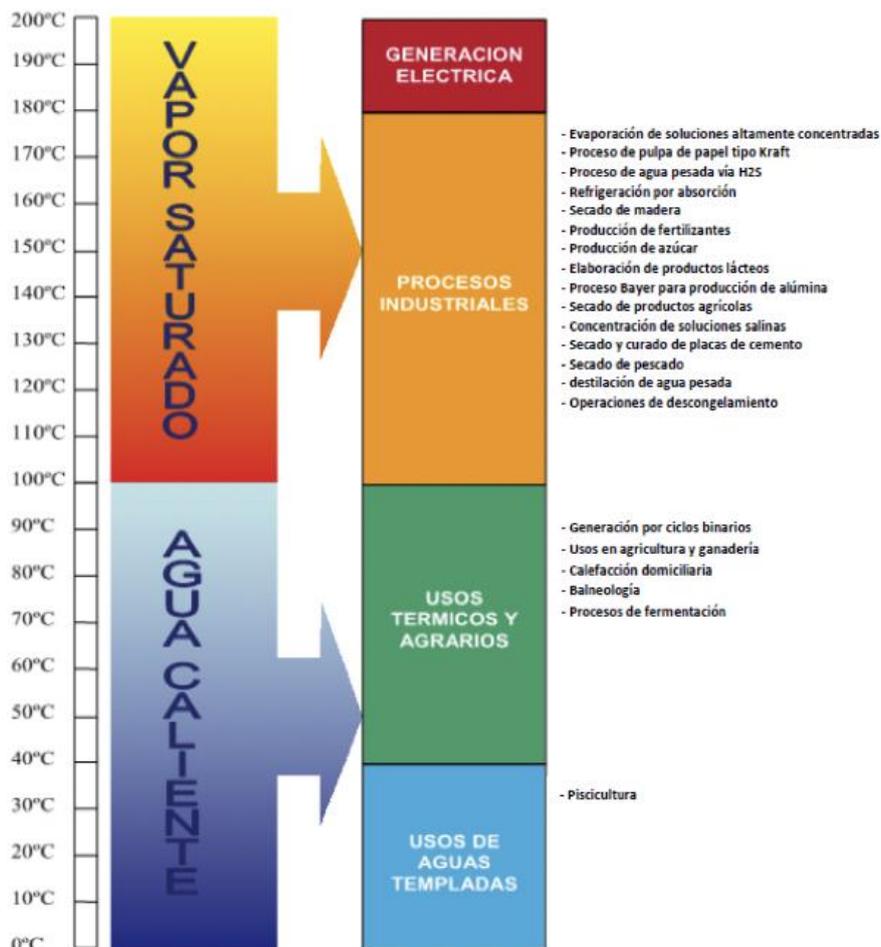


Figura 4.8. Usos de la energía geotérmica.

Fuente: <http://egresadoselectronicaunc.blogspot.mx/2012/09/usuarios-de-la-energia-geotermica.html>

Según datos de la *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21)* para finales del 2016 los 10 países con la mayor capacidad instalada de generación eléctrica mediante energía geotérmica eran; Estados Unidos (3.6 GW), Filipinas (1.9 GW), Indonesia (1.6 GW), Nueva Zelanda (1.0 GW), México (0.9 GW), Italia (0.8 GW), Turquía (0.8 GW), Islandia (0.7 GW), Kenia (0.6 GW) y Japón (0.5 GW), ver figura 4.9.

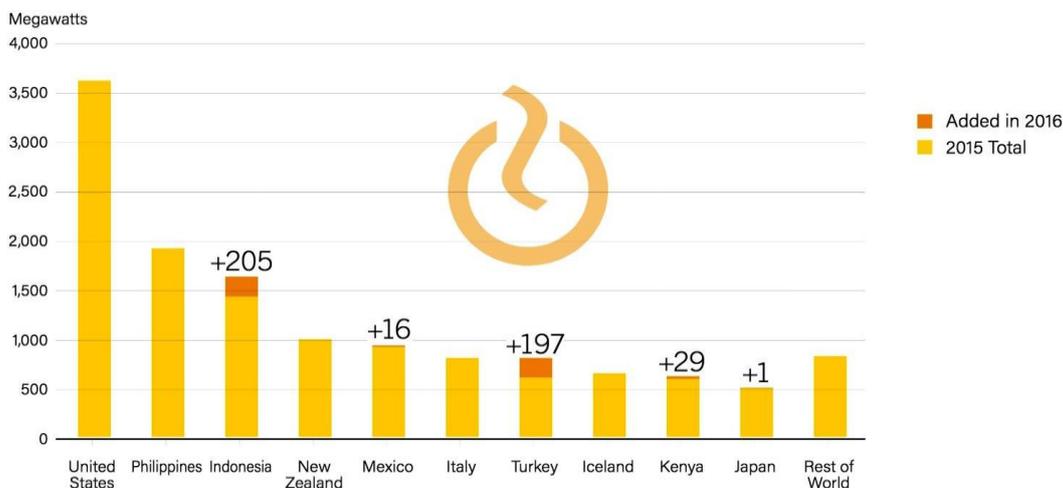


Figura 4.9. Potencial geotérmico instalado y sus adiciones, de los 10 países principales y resto del mundo, durante el 2016. Fuente: RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).

En los casos en los que la temperatura de los yacimientos geotérmico no es lo suficientemente elevada como para generar vapor de manera natural, se puede implementar una tecnología denominada de ciclo binario en la que el fluido geotérmico evapora un “fluido de trabajo”, de bajo punto de ebullición, para posteriormente ingresarlo a la turbina que acciona el generador eléctrico y por último ser condensado y bombeado al evaporador nuevamente, generando un ciclo cerrado (MinE, 2008), ver figura 4.10. La principal desventaja de este tipo de instalaciones, son los altos costos de los equipos que se emplean para su funcionamiento, lo que incrementa el costo de la energía generada volviéndolas incompetentes en comparación con otro tipo de plantas de generación eléctrica.

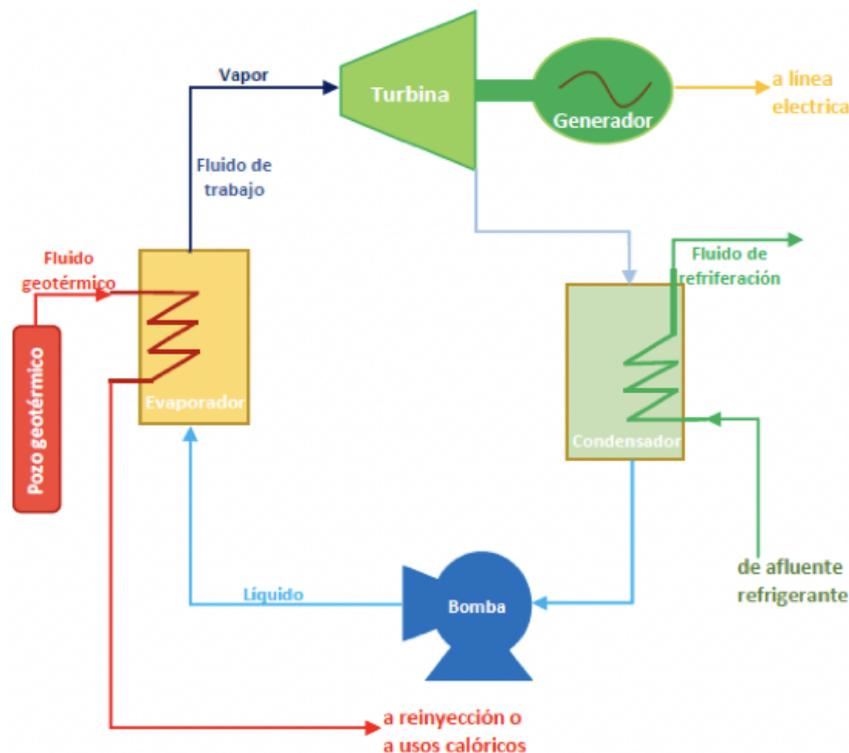


Figura 4.10. Diagrama de una planta de generación eléctrica de ciclo binario.

4.4. Biomasa

Se considera como biomasa a toda aquella materia orgánica de origen animal, vegetal o la que se deriva de la transformación natural o artificial de la misma, de la cual, mediante diversos procesos, es posible obtener combustibles líquidos, sólidos y gaseosos. La energía obtenida de la biomasa se origina del proceso fotosintético de las plantas, las cuales mediante el aprovechamiento de la luz solar y del CO₂ contenido en el aire, sintetizan las sustancias orgánicas. Durante estos procesos se transforma la energía solar en energía química que se acumula en diversos compuestos orgánicos (Schallenberg, 2008).

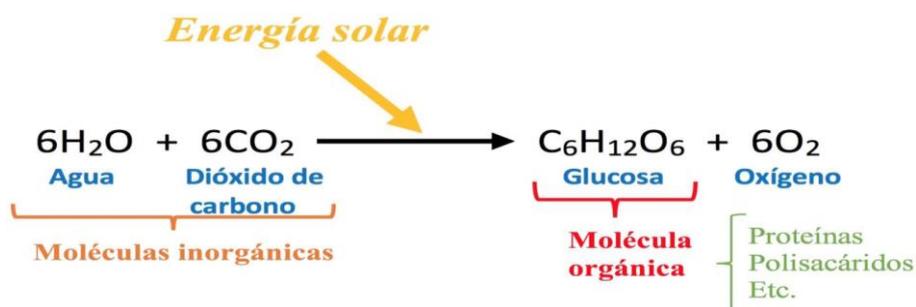


Figura 4.11. Ecuación química global de la fotosíntesis.

Con el descubrimiento del fuego, la biomasa se convirtió en el primer combustible empleado por el hombre, se utilizaba para una gran cantidad de tareas y fungió como el principal combustible hasta la revolución industrial, a mediados del siglo XVIII, cuando fue necesario comenzar a implementar fuentes energéticas que presentaran un mayor poder calorífico.

En la actualidad la biomasa sigue teniendo un papel importante como fuente energética tanto en las aplicaciones domésticas como industriales.

4.4.1. Fuentes de biomasa

Toda la materia orgánica puede ser transformada en energía útil, mediante un proceso adecuado de conversión; tradicionalmente la biomasa, empleada por el ser humano para cubrir sus requerimientos energéticos básicos, era generada de manera natural por el medio ambiente. Debido a la investigación y el desarrollo tecnológico que han permitido considerar a la biomasa como una alternativa confiable para la generación de energía, se han tenido que considerar nuevas fuentes de obtención de biomasa que no impacten de manera negativa en el medio ambiente.

Los residuos de la actividad forestal, agrícola, pecuaria, así como los generados en las zonas urbanas se han convertido en una excelente fuente de biomasa, considerando que una parte de estos residuos se debe de reincorporar al suelo para mantener su fertilidad y textura (Schallenberg, 2008). Cuando el requerimiento de biomasa es elevado, se realizan cultivos agrícolas y forestales destinados exclusivamente para la generación de biomasa, denominados cultivos energéticos.

RECURSOS FORESTALES.- En esta categoría se engloban los residuos generados naturalmente por el ecosistema, como es la naturaleza muerta, y la generada por la actividad humana mediante talas, podas, clareos, cosechas, raleo, etc., así como los desechos de los aserraderos.

Para los cultivos energéticos, es necesario seleccionar la especie forestal adecuada al uso energético que se le pretende dar a la biomasa obtenida; se eligen especies de rápido crecimiento y ciclos breves de corte y rebrote, de entre 3 a 7 años.

RECURSOS AGRÍCOLAS.- Son los residuos que se generan de los cultivos de plantaciones con fines alimentarios o industriales como los bagazos, rastrojos, tallos, cascara, entre otros, junto con las plantaciones energéticas de caña, girasol, etc.

RECURSOS PECUARIOS.- La biomasa que se obtiene de la industria pecuaria proviene de los desechos fecales de los animales que se crían masivamente. Es considerada la materia prima más eficiente para la producción de biogás, mediante el proceso de fermentación aeróbica.

RESIDUOS URBANOS.- Las zonas urbanas también resultan una excelente fuente de biomasa. Los residuos líquidos y sólidos, que en ellas se generan, pueden emplearse para la obtención de biocombustibles. Con la implementación de los residuos sólidos como biomasa se atiende de manera conjunta el grave problema de contaminación que estos generan, al simplemente ser depositados en rellenos sanitarios, los residuos líquidos contenidos en las redes de alcantarillado pueden ser empleados para la obtención de biogás.

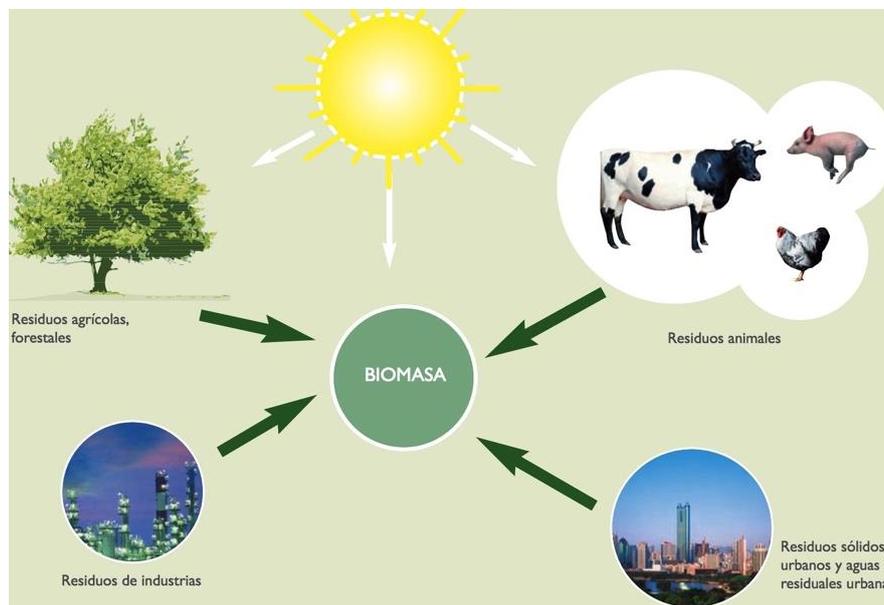


Figura 4.12. Aprovechamiento de la biomasa.

Fuente: <https://www.cienciacanaria.es/files/Libro-de-energias-renovables-y-eficiencia-energetica.pdf>

4.4.2. Procesos para la conversión de la biomasa en energía

La biomasa presenta un bajo contenido de carbono, un elevado contenido de oxígeno y compuestos volátiles formados por cadenas de átomos de carbono e hidrógeno entrelazados entre sí, en los que se concentra la mayor parte del poder calorífico de la biomasa. El poder calorífico de la biomasa depende en gran parte del tipo de biomasa y de la cantidad de humedad que ésta contiene, encontrándose de manera general en los siguientes rangos:

- Entre 13 y 17 MJ/kg, para residuos lignocelulósicos (materiales formados por celulosa, hemicelulosa y lignina).
- Entre 8 y 10 MJ/kg, para residuos urbanos.

- Aproximadamente 42 MJ/kg, para combustibles líquidos provenientes de cultivos energéticos.

Otras características de la biomasa son su bajo contenido de azufre y que su aprovechamiento no contribuye al incremento de los gases de efecto invernadero, esto se debe a que las emisiones de CO₂ que se generan durante su combustión son absorbidas mediante la fotosíntesis de las nuevas plantas que se emplearan para generar más biomasa.

Es conveniente clasificar a la biomasa en dos grandes grupos:

BIOMASA HÚMEDA.- Contiene una humedad superior al 60%, se puede convertir en energía mediante procesos bioquímicos y en casos particulares por procesos físicos. De este tipo de biomasa se pueden obtener combustibles líquidos y gaseosos.

BIOMASA SECA.- Presenta una humedad inferior al 60%, se emplea mediante procesos fisicoquímicos o termoquímicos para la producción directa de energía térmica o productos secundarios como combustibles líquidos, sólidos o gaseosos.

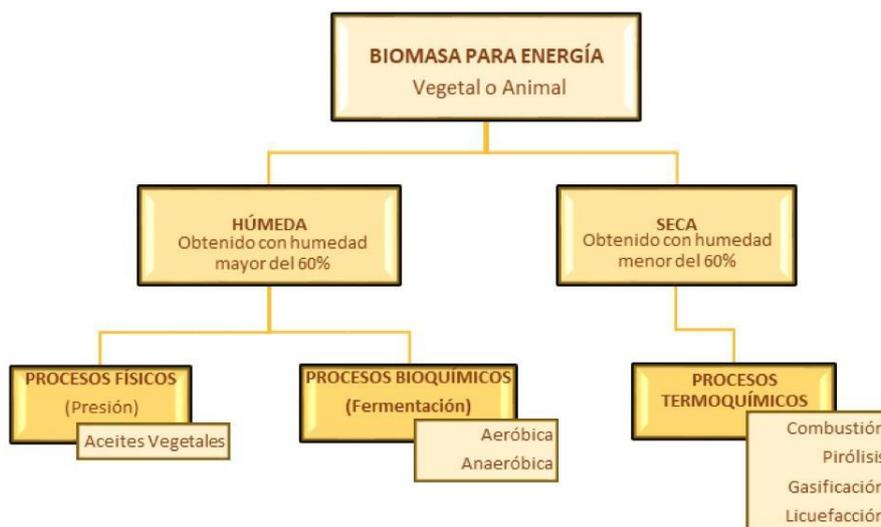


Figura 4.13. Esquema de la clasificación de la biomasa y sus respectivos procesos de conversión.

La figura 4.13 muestra la clasificación de la biomasa de acuerdo con la humedad que contiene y aunque esta clasificación resulta un tanto arbitraria, permite esquematizar los procesos de conversión, que a continuación se describen.

4.4.2.1. Procesos bioquímicos

En estos procesos la biomasa es degradada con la ayuda de microorganismos. Si la fermentación se realiza con la presencia de aire se denominan digestión aeróbica y cuando se realiza con la ausencia de éste se denomina digestión anaeróbica, ver figura 4.14.

DIGESTIÓN AERÓBICA (FERMENTACIÓN AERÓBICA).- Al fermentar aeróbicamente biomasa con un alto contenido de almidones o azúcares se produce un combustible líquido de características

similares a los combustibles derivados del petróleo. Este combustible se conoce como etanol y las materias primas de las que se obtiene son: alimentos ricos en almidones, cultivos de azúcar y cereales, entre otros.

DIGESTIÓN ANAERÓBICA (FERMENTACIÓN ANAERÓBICA).- Esta fermentación se lleva a cabo en un recipiente cerrado (digestor) dentro del cual se genera un combustible gaseoso constituido básicamente de metano (CH_4) y dióxido carbono (CO_2), denominado biogás, para lo cual se emplean residuos de origen vegetal o animal de baja relación carbono/nitrógeno. El biogás se puede emplear de la misma forma que el gas natural, en caso de utilizarse como combustible de vehículos de transporte es necesario eliminar previamente su contenido de CO_2 .

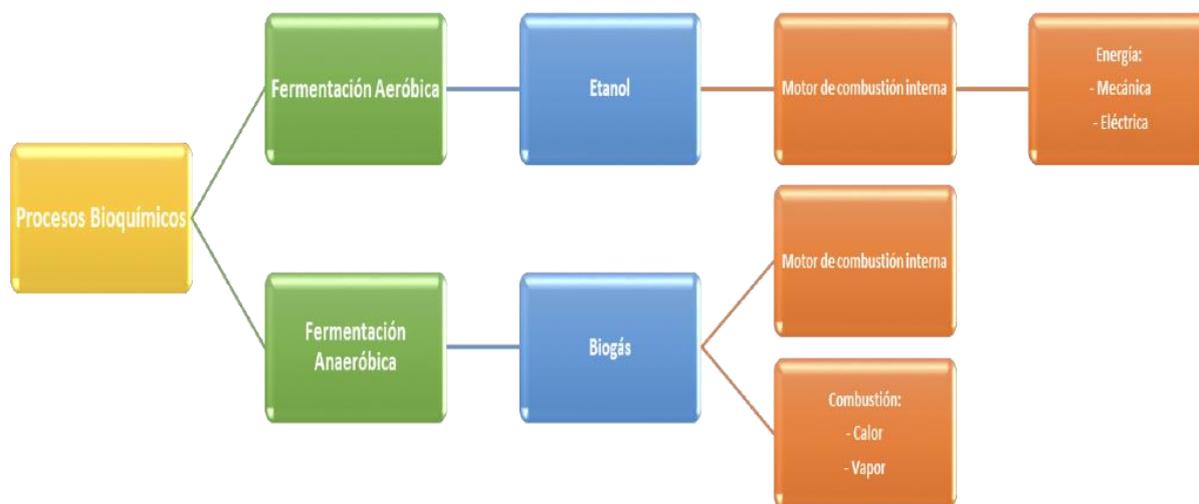


Figura 4.14. Esquema de los procesos de conversión empleados para la biomasa húmeda.

4.4.2.2. Procesos termoquímicos

Dentro de esta categoría se enlistan básicamente: la combustión, gasificación, pirólisis y licuefacción directa, que aún se encuentra en proceso de desarrollo, ver figura 4.15.

COMBUSTIÓN.- Es el proceso más simple y por lo tanto el más utilizado para la conversión de la biomasa en energía térmica, para usos domésticos o industriales, puede realizarse con tecnologías que van desde una simple fogata, hasta calderas industriales de alta generación de vapor.

GASIFICACIÓN.- Mediante la quema controlada de la biomasa, principalmente la proveniente de los residuos de la industria forestal, junto con un agente gasificante, dentro de un recipiente cerrado (gasificador), es posible obtener gas de síntesis. Aunque las características de este gas varían dependiendo del tipo de biomasa, el agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua o hidrógeno) y la tecnología empleada para su obtención, su implementación se generaliza para la producción de energía térmica y mecánica (IDEA, 2007)

PIRÓLISIS.- En este proceso se obtienen combustibles útiles (sólidos, líquidos y gaseosos) mediante el calentamiento de la biomasa a temperaturas del rango de los 350 a 650 °C, en ausencia de oxígeno. Por lo general, se produce a través de una serie de reacciones en las que influyen factores como: la estructura y composición de la biomasa, la tecnología utilizada, la duración, temperatura, velocidad de calentamiento y velocidad de enfriamiento del proceso. El producto que regularmente se pretende obtener es el carbón vegetal, con un mayor poder calorífico que el de la biomasa de la que se origina, y los combustibles líquidos y gaseosos que se generan son considerados subproductos del proceso.

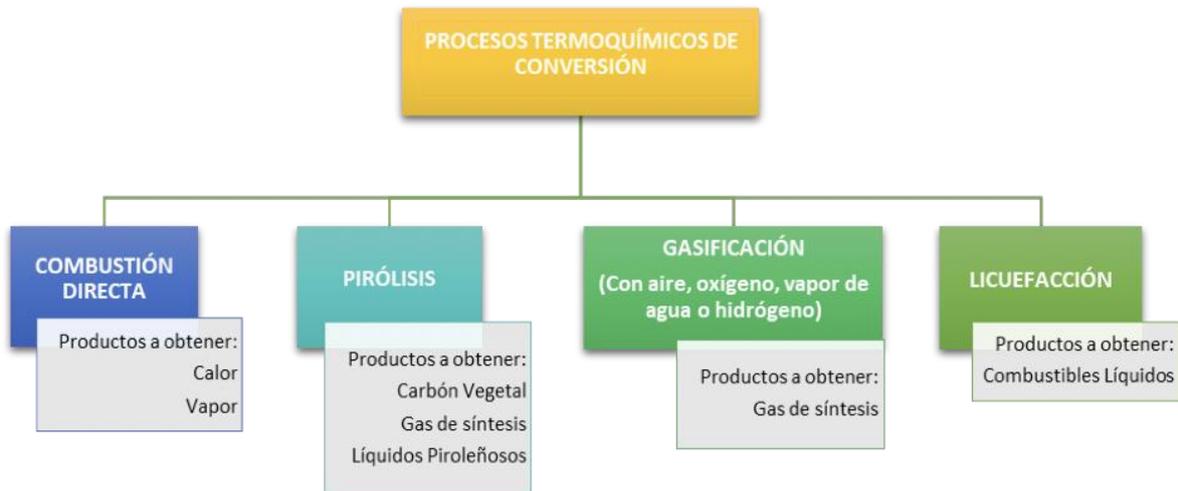


Figura 4.15. Esquema de los procesos termodinámicos de conversión de la biomasa.

5. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE MAR

Existen diversos factores que se deben de considerar al momento de diseñar una planta de desalación de agua de mar. Conocer las características del agua que se desea tratar es primordial, las dos principales son la salinidad y la temperatura del agua a la entrada de la planta. Estos parámetros varían dependiendo de la zona geográfica donde se requiere llevar a cabo la construcción de la planta de desalación.

En este capítulo se describirán las características del agua de mar y las variaciones que se presentan en diferentes regiones del planeta, así como las principales problemáticas que generan algunos de los componentes del agua de mar durante el proceso de desalación.

5.1. Salinidad

A la cantidad de sólidos disueltos totales (SDT) que se encuentran en el agua de mar se le conoce como salinidad. A partir del siglo XVII, el concepto de salinidad ha evolucionado gracias al avance que se ha logrado sobre las características de los océanos y de los aparatos de medición que se han desarrollado para tal fin.

El químico inglés Rober Boyle fue uno de los precursores en el estudio de la composición y variación de la salinidad en la superficie del agua de mar, los datos que obtuvo mediante el proceso de evaporación, fueron publicados en 1674 bajo el título de “Observations and Experiments about the Saltness of the Sea” y tuvo que pasar más de un siglo para que en 1772 el químico francés Antoine-Laurent de Lavoisier presentara a la Academia de Ciencias de su país los estudios que había realizado sobre este tema y se proclamara públicamente la composición del agua de mar. En 1784 el químico sueco Oloy Bergman publicó los resultados obtenidos de un análisis de agua de mar, mediante el método consistente en pesar las sales precipitadas. El método empleado en este análisis, además de permitir una mayor precisión en el contenido de sales en el agua de mar, sentó las bases para el desarrollo de la química analítica.

Alexander Marcet desarrolló entre 1819-1822, un análisis de alta precisión mediante métodos gravimétricos, en los cuales hizo precipitar sales en forma selectiva y mediante la masa de cada precipitado logro estimar la cantidad contenida de cada ion. Marcet propuso además que el agua de mar contenía pequeñas cantidades de todas las sustancias solubles y que la abundancia relativa de algunas de ellas era constante; hipótesis que se conoce hasta la actualidad como el “Principio de Marcet” o “Regla de Proporciones Constantes”, la cual establece que: *“independientemente de que la salinidad pueda variar de un lugar a otro, los elementos mayores del agua de mar en océano abierto se encuentran en proporciones constantes entre sí”* (Werlinger, 2004).

Para 1855 el 99% de los elementos que componen la sal marina habían sido descubiertos en el agua de mar. Ese mismo año, el danés Georg Forchhammer introdujo el concepto de salinidad, como el término para expresar el contenido de sales en el agua de mar. Forchhammer realizó análisis exhaustivos del agua de mar, logrando identificar en ella 27 elementos y confirmó la validez del Principio de Marcet para los iones más abundantes, tales como el Cloro, Sodio, Calcio, Potasio, Magnesio y Sulfato; también estableció que la salinidad del agua de mar podía ser inferida de la medición del Cloro (o clorinidad), en 1865 publicó los resultados de su investigación en la cual propuso la división del planeta en diferentes regiones, mostrando la salinidad de cada una de ellas, ver tabla 5.1. En 1883 el oceanógrafo escocés John Murray implemento por primera vez la medición de la salinidad basándose en la clorinidad del agua (Armijo, 2012).

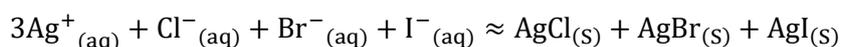
Tabla 5.1.
Salinidad de las diferentes regiones del planeta según G. Forchhammer.

Región	Océano/Mar	Situación	Salinidad [mg/l]		
			Mínima	Media	Máxima
1ª Región	Océano Atlántico	Entre el ecuador y latitud 30° Norte	34,283	36,169	37,908
2ª Región	Océano Atlántico	Entre latitud 30° Norte y la línea que va entre el punto norte de Escocia y el punto norte de la Isla de Terranova	33,854	35,946	36,927
3ª Región	Atlántico Norte	Entre la 2ª región y la línea que una Islandia con Labrador	34,831	35,391	36,480
4ª Región	Groenlandia	Mar de Groenlandia		35,278	
5ª Región A	Bahía de Baffin	Norte de Canadá	32,304	33,281	34,414
5ª Región B	Mar de Noruega y Mar de Barents	Mar de Noruega y Mar de Barents	34,396	35,327	36,254
5ª Región C	Océano Ártico	Océano Ártico		33,623	
6ª Región	Mar del Norte	Entre Noruega, Dinamarca y el Reino Unido	30,530	32,823	35,041
7ª Región	El estrecho de Kattegat	Entre el Mar Báltico y el Mar del Norte	19,716	29,441	42,163
8ª Región	Mar Báltico	Mar Báltico		9,048	13,728
9ª Región	Mar Mediterráneo		36,301	37,936	39,257
10ª Región A	Mar Negro	Mar Negro	11,880	15,894	18,146
10ª Región B	Mar Caspio	Los datos de Forchhammer no son precisos			
11ª Región	Océano Atlántico	Entre el ecuador y latitud 30° Sur	35,930	36,553	37,155
12ª Región	Océano Atlántico	Entre la 11ª región y la línea que une el Cabo de Hornos y el Cabo de Buena Esperanza	34,151	35,038	35,907
13ª Región	Océano Índico	Entre África y Malasia	25,879	33,868	35,802
14ª Región	Océano Pacífico Norte	Entre Filipinas, la costa sureste e Asia y las Islas Aleutianas	32,370	33,506	34,234
15ª Región	Océano Pacífico Central	Entre las Islas Aleutianas y las Islas de la Sociedad	34,157	35,219	36,061
16ª Región	Océano Pacífico Sur	Corriente de la Patagonia	33,788	33,966	34,152
17ª Región	Mar del Polo Sur		28,565		37,513

Los estudios realizados por Forchhammer concluyeron que la mayor parte de las salinidades del agua de mar del planeta se encuentra en el rango de entre 30,000 y 40,000 mg/l. Esta conclusión sigue siendo válida hasta nuestros días, aunque se han registrado mediciones en regiones concretas con valores por encima de los citados por Forchhammer, como la región del mar Muerto y la del Golfo Pérsico.

En 1884, el químico alemán William Dittmar publicó su libro “Composition of Ocean Water” en el cual estableció la teoría de la composición constante en el agua de mar, a partir de análisis elaborados en todos los mares del mundo, estableciendo un porcentaje constante para los principales iones del agua de mar.

A principios del Siglo XX, el físico danés Martin Knudsen, descubrió que entre la clorinidad y la salinidad existía una relación lineal. La clorinidad se define como la masa en gramos de halógenos, expresados como el contenido de Cloro que puede precipitarse en 1,000 g de agua de mar por Ag^+ . En la práctica la clorinidad se obtiene titulando la muestra de agua con una solución valorada de AgNO_3 , y la reacción de titulación que se genera es (Werlinger, 2004):



$$\text{Clorinidad (Cl)} = \frac{\text{Peso Atómico de Cl}^- \times \text{Moles necesarios de Ag}^+ \text{ para precipitar Cl}^-, \text{Br}^-, \text{I}^- \times 1000}{1000 \text{ g de Agua de Mar}} \quad (5.1)$$

De este modo, conociendo el contenido de cloruros, yoduros y bromuros de cierta agua de mar, es posible determinar el valor de su salinidad, mediante la siguiente formula:

$$\text{Salinidad} = 0.03 + 1.8050 \times \text{Cl} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \quad (5.2)$$

Este método se empleó, durante la primera mitad del siglo XX, para conocer la salinidad de los océanos. A partir de 1961 con el descubrimiento e implementación de aparatos de medición electrónicos, fue posible confirmar la relación entre la clorinidad y la salinidad, al mismo tiempo que se inició la medición de la salinidad del agua de mar con base en su conductividad eléctrica. La conductividad eléctrica es la medida, opuesta a la resistencia eléctrica, de la capacidad que presenta un material, o una sustancia, para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él. En el caso del agua de mar la conductividad eléctrica, depende del número de iones disueltos por unidad de superficie, de la presión y de la temperatura. La unidad que se emplea, en el Sistema Internacional de Unidades, para su medición son los siemens por metro (S/m), aunque en la práctica es muy común el uso de los microsiemens por centímetro ($\mu S/cm$).

En 1966, un conjunto de instituciones encabezadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, por sus siglas en inglés) se encargaron de publicar las “Tablas Oceanográficas Internacionales, Volumen I”, las cuales fueron recomendadas para el uso de todos los oceanógrafos. En dichas tablas, se redefinió la relación de la salinidad con la clorinidad quedando su fórmula de la siguiente manera:

$$\text{Salinidad} = 1.80655 \times \text{Cl} \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] \quad (5.3)$$

Al realizar una comparativa entre los resultados obtenidos empleando la clorinidad del agua de mar contra los resultados que consiguen al medir la conductividad de esta a 15 °C, solo se pueden apreciar mínimas diferencias entre ellos, debido a esto en 1978, un comité de expertos de la UNESCO propuso el uso de la Escala Práctica de Salinidad (PSS, por sus siglas en inglés), en la cual las unidades de medición que se emplean son las Unidades Prácticas de Salinidad (PSU, por sus siglas en inglés). En esta escala se redefine la salinidad en función de la razón de su conductividad y, por tanto, carece de unidades físicas, para ello se compara una muestra de agua de mar contra una mezcla homogénea de 32.4356 g de cloruro potásico (KCl) en 1 kg de solución, en condiciones estándar de 15 °C y 1 atm de presión. Para generar continuidad con las escalas anteriores, la muestra de agua empleada para determinar la conductividad igual a 1, fue obtenida del océano Atlántico Norte la cual contiene una clorinidad de 19.3740×10^{-3} , de este modo se definió el punto de salinidad 35×10^{-3} de la PSS.

La ecuación propuesta por la PSS para definir la salinidad en términos de la razón K_{15} es:

$$S(PSS) = 0.0080 - 0.1692K_{15}^{\frac{1}{2}} + 25.3851K_{15} + 14.0941K_{15}^{\frac{3}{2}} - 7.0261K_{15}^2 + 2.7081K_{15}^{\frac{5}{2}} \quad (5.4)$$

$$K_{15} = \frac{\text{Conductividad}_{(s,15,0)}}{\text{Conductividad}_{(KCl,15,0)}} \quad (5.5)$$

Cuando un conjunto de muestras presenta el mismo valor de K_{15} su salinidad también es igual en la PSS, en la cual, una salinidad de 35 PSU equivale a una salinidad de 35 g/l.

Existe además el concepto de Salinidad Absoluto (S_A), la cual no puede ser medida directamente en la práctica, y es definida como la razón de la masa del material disuelto en la muestra de agua entre la cantidad de masa de la solución que la contiene, es decir:

$$S_A = \frac{\text{Masa del Material Disuelto}}{\text{Masa de la Solucion que lo Contiene}} \quad (5.6)$$

Al no poder ser medida directamente en la práctica, para conocer el valor de S_A que se presenta en una muestra de agua, se emplea la siguiente relación:

$$S_A = a + bS \quad (5.7)$$

donde:

a y b son parámetros dependientes de las razones iónicas de la muestra,

S = salinidad en la PSS,

para el agua estándar: $a=0$ y $b=1.0049 \pm 0.0003$.

Las variaciones que presentan las mediciones de la salinidad con base en la clorinidad, la conductividad o en la PSS, son de poca importancia al momento de realizar los cálculos en el proceso de diseño de una planta de desalación.

En el 2011 la agencia de Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) inicio la misión "Aquarius, Sea Surface Salinity from Space" mediante la cual estudia y monitorea la salinidad superficial del mar y la humedad del suelo. Los datos obtenidos por esta misión pueden ser consultados en el sitio web de la NASA.

En el mapa mostrado en la figura 5.1 se aprecia que la mayoría de los mares y océanos tienen una salinidad de entre 30 y 40 g/l. Datos que coinciden con los reportados por Forchhammer hace más de 160 años.

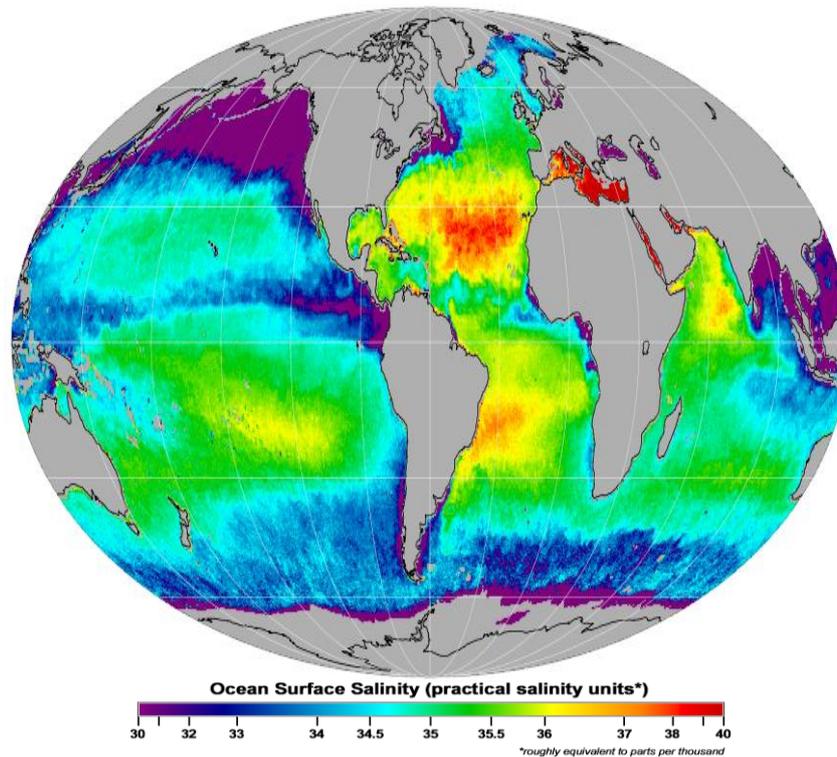


Figura 5.1. Salinidad superficial de los océanos medida desde el espacio por la NASA.
Fuente: <https://aquarius.nasa.gov/>.

5.2. Composición iónica del agua de mar

Como ya se ha determinado, la salinidad es una propiedad química resultante de la disolución de diferentes sales que se encuentran en el agua de mar, las principales de ellas son: cloruros, carbonatos y sulfatos, y se conforman a partir de iones con carga positiva (cationes) e iones con carga negativa (aniones).

Los iones que más se presentan en el agua de mar reciben el nombre de “conservativos”, debido a que se encuentran en proporciones constantes, y son los siguientes:

- Calcio.
- Sodio.
- Potasio.
- Cloro.
- Magnesio.
- Sulfato.

Existen muchos más compuestos y elementos presentes en el agua de mar, los cuales son llamados “no conservativos” debido a que su concentración no es constante, pues depende de diversos procesos físicos, químicos y biológicos, y aunque la mayoría de las sustancias

presentes en el agua de mar son *no conservativas*, todas ellas representan una mínima fracción de las sales totales de dicha agua.

Los porcentajes de los principales iones que se encuentran en el agua de mar publicados por W. Dittmar en 1884, sufrieron algunas variaciones debido a que algunos de elementos presentaron correcciones en su peso atómico. Por esta razón, en 1940 J. Lyman y R.H. Fleming publicaron un artículo titulado “*Composition of seawater*” en la revista *Journal of Marine Research*, en donde actualizaron los valores de los porcentajes de los principales iones contenidos en el agua de mar. La comparativa de los resultados obtenidos por Dittmar y los obtenidos por Lyman & Fleming se muestra en la tabla 5.2.

Tabla 5.2.
Proporción de los principales iones del agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Fleming.

		W. Dittmar 1884	Lyman & Fleming 1940
Potasio	K^+	1.13%	1.10%
Sodio	Na^+	30.66%	30.70%
Magnesio	Mg^{2+}	3.65%	3.7%
Calcio	Ca^{2+}	1.17%	1.16%
Estroncio	Sr^{2+}		0.04%
Bicarbonato	HCO_3^-	0.30%	0.41%
Cloruro	Cl^{2-}	50.02%	55.19%
Sulfato	SO_4^{2-}	7.71%	7.70%

Las combinaciones entre los iones mostrados en la tabla anterior dan lugar a las sales que se presentan en el agua de mar, siendo las de mayor proporción el Cloruro de Sodio ($NaCl$) y el Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$) con un aproximado del 80% y 10% respectivamente, los sulfatos también representan otro porcentaje importante de estas sales con un 8% aproximadamente, por lo que la suma de estas sales representa alrededor del 98% del total de sales disueltas en el agua de mar (Cifuentes, 1997).

En ocasiones al momento de realizar los cálculos y el diseño de los sistemas de desalación de agua de mar es necesario la utilización de agua de mar sintética para la realización de pruebas experimentales en los materiales y equipos que se desean emplear, por ello es importante conocer la composición iónica del agua de mar en g/kg, ver tabla 5.3.

Tabla 5.3.
Composición iónica del agua de mar en g/kg.

Componente	Cantidad [g]
Cl^-	18.9799
Na^+	10.5561
SO_4^{2-}	2.6486
Mg^{2+}	1.2720
Ca^{2+}	0.4001
K^+	0.3800
HCO_3^-	0.1397
Br^-	0.0646
H_3BO_3	0.0260
Sr^{2+}	0.0133
F^-	0.0013
Sólidos Totales	34.4816
Agua	965.5184
TOTAL	1000.0000

5.3. Temperatura

El otro parámetro de mayor relevancia para el análisis y diseño de un proceso de desalación de agua de mar es la temperatura a la cual ésta accede al sistema. Del mismo modo que ocurre con la salinidad, la temperatura del agua de mar varía dependiendo de la zona geográfica y del periodo del año en el que se encuentre.

La temperatura en los mares y océanos también se ve afectada por la profundidad a la que se tome la medición de la temperatura, debido a que en aguas profundas la temperatura es menor que en aguas superficiales, en donde inciden los rayos solares, y debido a que el Sol no calienta la superficie terrestre de manera homogénea, la temperatura de los océanos también presenta el mismo patrón de calentamiento que en los continentes, es decir, la temperatura del agua de mar presenta sus valores más elevados cerca de la línea ecuatorial y decrece de manera general hasta llegar a los polos. Los rangos de temperatura van de un máximo de entre 29 y 30 °C en los mares tropicales hasta un mínimo de -1.8 °C en los mares polares, los cuales se encuentran congelados la mayor parte del año, ver figura 5.2.

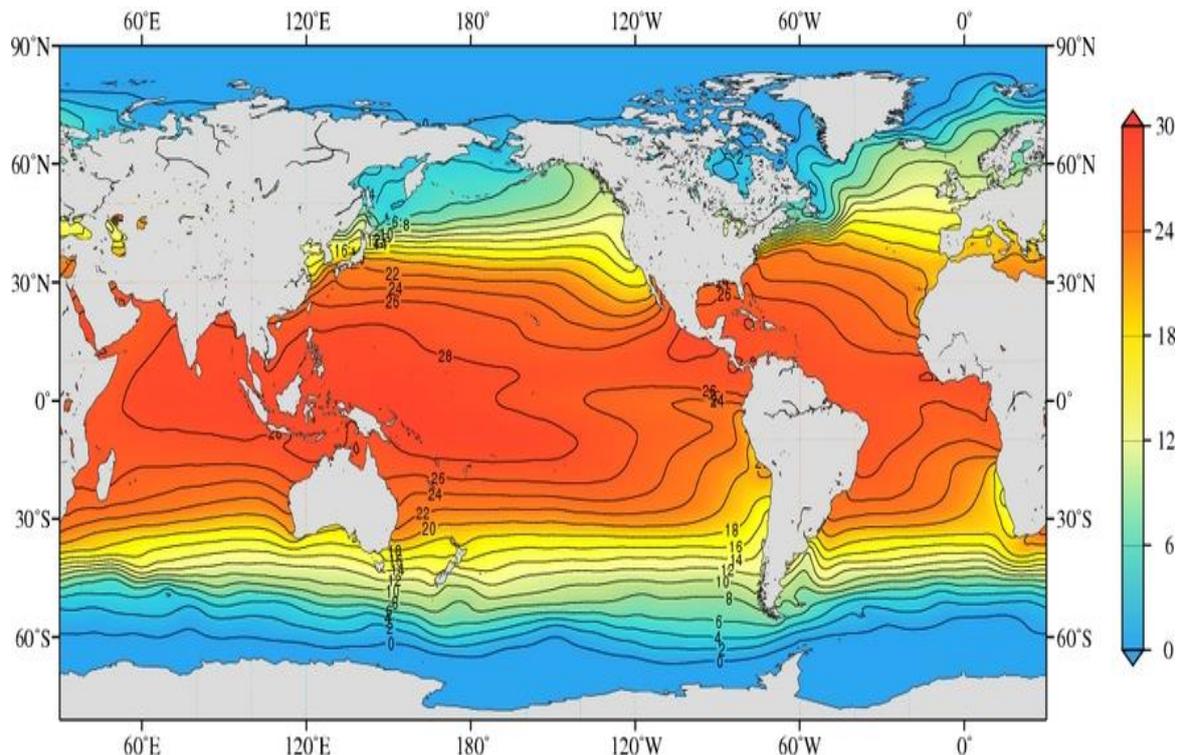


Figura 5.2. Temperatura anual en la superficie del mar (°C).

Fuente: <https://www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/>

En la mayoría de las plantas de desalación, el agua de abastecimiento es tomada de regiones cercanas a las costas, a una profundidad que va desde la superficie hasta los 25 metros, esto se debe a que las temperaturas de las aguas que se encuentran en este rango de profundidad no presentan grandes variaciones.

La temperatura del agua de mar presenta su mayor variación en sus zonas iluminadas, es decir, entre la superficie del mar y los mil metros de profundidad, esto abarca la zona fótica (<200 m

de profundidad) y la zona oligofótica (entre 200-1000 *m* de profundidad), en la zona afótica (>1,000 *m* de profundidad) la temperatura del agua permanece estable entre 1 y 4 °C.

En la tabla 5.4 se muestran, para su comparativa, los rangos de temperaturas de diferentes mares y océanos, en donde se puede apreciar que en las zonas cercanas a la costa y en superficie, la mayoría de las temperaturas se encuentran entre los 10°C y los 30°C.

Tabla 5.4.
Temperaturas máximas y mínimas de diferentes puntos geográficos.

Región	Rango de temperaturas
Mar Mediterráneo	Mínima de 11°C y máxima de 28°C.
Mar del Norte	Mínima de 6°C y máxima de 17°C
Océano Atlántico Central	Mínima de 3.8°C y máxima 30°C, con temperaturas en zonas cercanas a la costa de entre 10°C y 29°C
Océano Atlántico Sur	Mínima de -1.5°C y máxima de 28°C, con temperaturas en zonas cercanas a la costa de entre 10°C y 27.5°C
Mar de Arabia	Mínima de 20°C y máxima de 30°, aunque existen zonas concretas del Golfo Pérsico con temperaturas más elevadas.
Océano Índico	Mínima de 11°C y máxima de 30°C.
Mares de Australia	Mínima de 11°C y máxima de 29°C
Océano Pacífico	Mínima de -0.6°C y máxima de 29.8°C, con temperaturas en zonas cercanas a la costa de entre 10°C y 29°C.

Fuente: Datos obtenidos de los Centros Nacionales de Información Ambiental de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EUA (NOAA, por sus siglas en inglés).

5.4. Sólidos en suspensión

Los sólidos en suspensión comprenden a todas aquellas sustancias que están suspendidas dentro del agua de mar y no decantan de manera natural. Puede tratarse de materia particulada orgánica e inorgánica, algunos ejemplos son: algas, sargazo, arenas, fangos, arcillas, grasas, aceites, etc.

La presencia de sólidos en suspensión contribuye al desarrollo de la turbidez y la variación en el color del agua.

5.5. pH

El pH es otro de los factores fisicoquímicos importantes en la caracterización del agua de mar, en una solución acuosa, el pH se define a partir de la concentración molar en iones H^+ , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$pH = -\log[H^+] \quad (5.8)$$

Las variaciones en el pH se relacionan al aumento en salinidad y temperatura, el aumento de la acidez y la profundidad de las aguas. Su valor típico, en agua de mar, se encuentra alrededor de 8 (Cifuentes, 1997). En los procesos de desalación, este valor puede ser modificado, dependiendo de las necesidades de los equipos, con ayuda de pretratamientos químicos.

5.6. Componentes microbiológicos

Estos componentes son indicadores de contaminación y/o microorganismos patógenos, tales como bacterias, virus, parásitos y otros organismos que son resultado de fuentes de contaminación como las descargas residuales e industriales, los escurrimientos de agua de lluvia o ríos contaminados que desembocan en el mar. Los principales componentes microbiológicos que se pueden encontrar en el agua de mar son:

Coliformes.- Los coliformes son microorganismos contaminantes provenientes de las heces fecales, ya sea de los seres humanos o de otros animales. Las bacterias coliformes más comunes son la *Escherichia coli* y la *Enterococcus faecalis*, que residen en el tracto gastrointestinal de humano y algunos otros mamíferos.

Plancton.- Son microorganismos subdivididos en Fitoplancton y Zooplancton los cuales conforman el primer eslabón de la cadena alimenticia. El fitoplancton son organismos vegetales, su producción se relaciona a las concentraciones de fosfatos y nitrógeno, el zooplancton son microorganismos animales que se alimentan del fitoplancton. Si la producción de fitoplancton es muy elevada y no puede ser consumido en su totalidad por el zooplancton, se provocan problemas de desbalances en el agua de mar ocasionados por el déficit de oxígeno que origina la descomposición del fitoplancton.

5.7. Solubilidad de las sales

La solubilidad es la capacidad que presenta cierta sustancia (solute) para disolverse dentro de otra (solvente), esta capacidad depende de diversos factores como lo son:

- La temperatura
- El pH
- La presión
- Las propiedades del soluto y del solvente

La solubilidad de un sólido dentro de un líquido se incrementa por lo general cuando aumenta la temperatura, aunque existen muchos compuestos de calcio y algunos otros, en el que su solubilidad varía de manera inversa y existen casos como el del cloruro de sodio en el que su solubilidad prácticamente no sufre variación con la modificación de la temperatura (Barreto, 2011). En la tabla 5.5, se muestra la solubilidad de algunas sales que conforman el agua de mar.

Existen algunas sales dentro del agua de mar que presentan ciertas problemáticas durante los procesos de desalación, las cuales se describen brevemente a continuación:

Carbonato de calcio (CaCO₃).- El *CaCO₃* disminuye su solubilidad con el aumento de la temperatura y el pH, se presenta en 4 formas salinas y se deposita al calentar el agua de mar a 60°C sin que se lleve a cabo evaporación.

Tabla 5.5.
Solubilidades de algunas sales, en g sal/100 ml de agua a 30°C.

Sal	Solubilidad
Bromuro de Calcio (CaBr₂)	142
Cloruro de Calcio (CaCl₂)	102
Bromuro de Sodio (NaBr)	73.3
Cloruro de Magnesio (MgCl₂)	54.5
Sulfato de Sodio decahidratado (Na₂SO₄·10H₂O)	40.8
Carbonato de Sodio (Na₂CO₃)	38.8
Cloruro de Potasio (KCl)	37
Cloruro de Sodio (NaCl)	36.3
Sulfato de Calcio (CaSO₄)	0.209
Carbonato de Calcio (CaCO₃)	0.084
Sulfato de Estroncio (SrSO₄)	0.0114
Carbonato de Magnesio (MgCO₃)	0.0106

Sulfato de calcio (CaSO₄).- El CaSO₄ desarrolla solubilidad inversa con el aumento de temperatura, se presenta 3 formas salinas y en los casos donde se evapora una tercera parte del volumen original del agua a 100°C el CaSO₄ precipita, pasa lo mismo con otros sulfatos.

Hidróxido de magnesio (Mg(OH)₂).- A pesar de que la solubilidad del Mg(OH)₂ aumenta con la temperatura, ésta disminuye al aumentar el pH, precipita al superar los 60 °C si se evapora la mitad del volumen original y un pH igual a 8.1

En los procesos térmicos de desalación, al evaporar una parte del agua que ingresa a la planta la concentración de sales en el agua restante aumentara, lo mismo pasa en los procesos de desalación por filtración después de hacer pasar el agua de alimentación por el sistema de membranas. En ambos casos es necesario tener un adecuado control de la concentración de sales que se genera en el agua que seguirá recirculando dentro de la planta de desalación, esto es debido a que no se debe de llegar a niveles elevados de concentración en donde la sobresaturación de sales en el agua de mar genera un estado de inestabilidad en el cual las sales precipitan de manera espontánea. Por tal motivo, al momento de diseñar los equipos de desalación debe de tomarse muy en cuenta el llamado *Factor de Concentración* el cual por lo regular tienen un valor típico de entre 1.3 a 1.5, es decir, la salinidad no debe de superar 1.5 veces su valor original que presentaba a la entrada de la planta para mantenerse en un estado de estabilidad en el cual no se generen precipitaciones de sales.

En la figura 5.3 se puede observar de manera gráfica el estado de estabilidad e inestabilidad del agua de mar al momento de aumentar tanto su concentración como su temperatura, en medio de ambos estados se encuentra un estado llamado Metaestable, en el cual se mantiene la estabilidad dentro del agua de mar durante un cierto periodo de tiempo lo que se puede conseguir al realizar incrementos moderados de concentración o de temperatura.

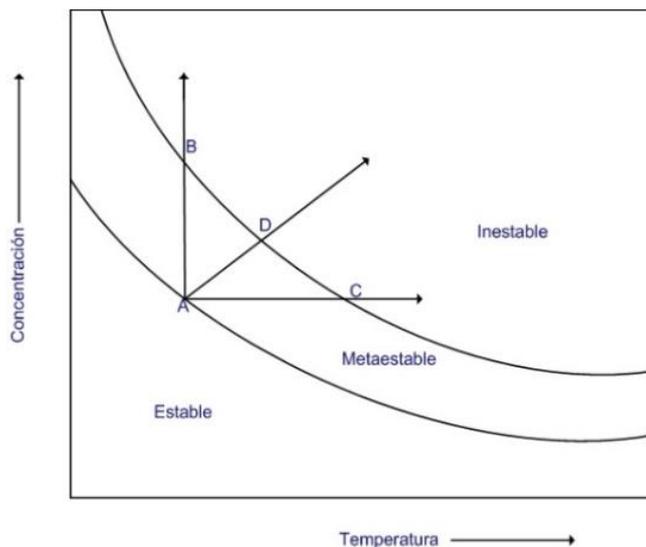
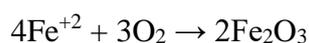


Figura 5.3. Gráfica de la Solubilidad de las sales en el agua de mar.

Las altas concentraciones de sales y el aumento de la temperatura en el agua de mar pueden generar incrustaciones causantes de pérdidas térmicas y un potencial de corrosión elevado.

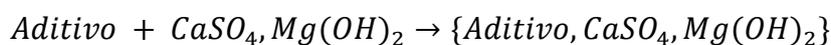
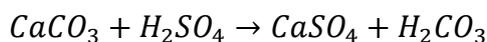
Las incrustaciones son depósitos cristalinos duros que se sitúan en las superficies que tienen contacto con el agua de mar y pueden producir:

- Reducción del área de transferencia de calor y de filtrado, según sea el caso.
- Incremento de la caída de presión por la reducción del área de flujo
- Favorecen la corrosión, que consiste en la oxidación de los metales, ocasionando sobre de éste un desgaste y picaduras, en casos extremos. Los componentes ferrosos y cuprosos que conforman las plantas desaladoras se oxidan de acuerdo con las reacciones:



Estas problemáticas son el principal motivo que se requiera de pretratamientos químicos previo al ingreso del agua de mar a las plantas de desalación. Con estos pretratamientos se pretende atrapar y sedimentar conjuntamente al sulfato de calcio y el hidróxido de magnesio, para lo cual se emplean aditivos tales como:

- Polifosfatos,
- Compuestos de ácido fosfónico y sulfónico,
- Polímeros del ácido acrílico y
- Compuestos del ácido polimaléico



5.8. Aumento del punto de ebullición en el agua de mar

La temperatura a la cual la presión de vapor de un disolvente o una solución se iguala con la presión externa se le conoce como punto de ebullición.

A presión atmosférica, la temperatura de ebullición de un disolvente puro es menor a la temperatura de ebullición cuando éste se encuentra en solución, esto se debe a que al adicionarle un soluto, disminuye la presión de vapor en la solución formada. Este incremento de temperatura es directamente proporcional a la molalidad del soluto presente y a la constante ebulloscópica (K_e), característica de cada disolvente, la cual no depende de la naturaleza del soluto (El-Dessouky, 2002).

De manera general, para calcular el aumento en la temperatura del punto de ebullición de una solución se emplea la siguiente fórmula:

$$\Delta T_e = K_e \times m \quad (5.9)$$

donde:

$\Delta T_e = T - T_e$ = Aumento del punto de ebullición, donde T es la temperatura de ebullición de la solución y T_e es la temperatura de ebullición del disolvente puro.

K_e = Constante ebulloscópica, en el caso del agua su valor es de $0.512 \frac{^\circ\text{C Kg}}{\text{mol}}$.

m = Molalidad, expresada en moles de soluto por kilogramo de disolvente $\frac{\text{mol}}{\text{kg}}$.

Debido a la gran cantidad de componentes que se presentan en el agua de mar, el cálculo de su molalidad puede tornarse un tanto complejo. Es por ello que se elaboraron tablas en las cuales se muestra el aumento en el punto de ebullición del agua de mar a distintas salinidades y temperaturas, ver tabla 5.6.

Se han desarrollado diversas fórmulas para conocer el aumento del punto de ebullición del agua de mar en función de su porcentaje de salinidad y la temperatura de ebullición, los resultados que se obtienen de dichas fórmulas presentan mínimas variaciones las cuales se pueden considerar despreciables. Debido a que cada una de estas fórmulas es aplicable a diferentes rangos de temperatura y salinidad, es importante seleccionar adecuadamente la fórmula que se implementará en el proceso de cálculo y diseño de los equipos de desalación. La elaboración de la tabla 5.6 se realizó empleando la siguiente fórmula (El-Dessouky, 2002):

$$APE = AX + BX^2 + CX^3 \quad (5.10)$$

para:

$$A = (8.325 \times 10^{-2} + 1.883 \times 10^{-4}T + 4.02 \times 10^{-6}T^2) \quad (5.10.1)$$

$$B = (-7.625 \times 10^{-4} + 9.02 \times 10^{-5}T - 5.2 \times 10^{-7}T^2) \quad (5.10.2)$$

$$C = (1.522 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-6}T - 3 \times 10^{-8}T^2) \quad (5.10.3)$$

donde:

APE = Aumento en el punto de ebullición del agua de mar.

A, B, C son parámetros dependientes de la temperatura de ebullición del agua pura.

X = Peso de la sal, en %.

T = Temperatura de ebullición del agua pura, en °C.

La fórmula anterior es válida únicamente para los siguientes rangos de salinidad y temperatura:

$$1 \leq X \leq 16\%$$

$$10 \leq T \leq 180^\circ\text{C}$$

Tabla 5.6.

Variación en la elevación del punto de ebullición del agua de mar en función de la temperatura y la salinidad.

Temperatura °C	Salinidad (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
10	0.085	0.171	0.258	0.348	0.441	0.538	0.639
15	0.087	0.175	0.266	0.359	0.456	0.556	0.662
20	0.089	0.180	0.273	0.370	0.470	0.575	0.684
25	0.091	0.185	0.281	0.381	0.485	0.593	0.706
30	0.093	0.190	0.290	0.393	0.500	0.612	0.727
35	0.096	0.195	0.298	0.405	0.516	0.630	0.748
40	0.099	0.201	0.307	0.417	0.531	0.648	0.769
45	0.101	0.207	0.316	0.430	0.546	0.666	0.789
50	0.104	0.213	0.326	0.443	0.562	0.684	0.809
55	0.108	0.220	0.336	0.456	0.578	0.703	0.829
60	0.111	0.227	0.346	0.469	0.594	0.721	0.848
65	0.115	0.234	0.357	0.483	0.610	0.739	0.866
70	0.118	0.241	0.368	0.497	0.627	0.756	0.885
75	0.122	0.249	0.379	0.511	0.643	0.774	0.903
80	0.126	0.257	0.391	0.525	0.660	0.792	0.921
85	0.130	0.265	0.402	0.540	0.677	0.810	0.938
90	0.135	0.274	0.415	0.555	0.694	0.828	0.955
95	0.139	0.283	0.427	0.571	0.711	0.845	0.971
100	0.144	0.292	0.440	0.587	0.728	0.863	0.987
105	0.149	0.301	0.453	0.603	0.746	0.880	1.003
110	0.154	0.311	0.467	0.619	0.764	0.898	1.018

6. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UNA PLANTA DE EIME

El análisis termodinámico es una excelente herramienta mediante la cual es posible cuantificar la eficiencia de un proceso y evidenciar las posibles mejoras que se le pueden realizar.

Al momento de realizar un análisis termodinámico a las plantas de desalación se logra conocer, con la aplicación de la primera ley de la termodinámica, los balances de masa y energía de los procesos de desalación y subprocesos que pudieran existir dentro de la planta, del mismo modo, implementando la segunda ley de la termodinámica es posible realizar un balance exergético para cuantificar la eficiencia de la planta, de los subprocesos y componentes que la conforman, todo lo anterior con la finalidad de poder determinar aquellos que sean susceptibles de mejoras.

Para este trabajo de tesis, se elaboró un análisis termodinámico a cada uno de los tres procesos más empleados a nivel mundial para la desalación de agua de mar, documentando en este capítulo el análisis realizado a una planta del tipo EIME y en los dos capítulos siguientes a plantas tipo EME y OI, respectivamente.

Para la elaboración de los análisis de las tres plantas se requiere conocer algunas propiedades del agua de mar y para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones (Kahraman, 2005).

Para la fracción masa (mf) de la sal y del agua se tiene que:

$$mf_s = \frac{m_s}{m_{sw}} = \frac{N_s M_s}{N_{sw} M_{sw}} = x_s \frac{M_s}{M_{sw}} \quad (6.1.a)$$

$$mf_w = x_w \frac{M_w}{M_{sw}} \quad (6.1.b)$$

donde:

mf = Fracción masa

m = Masa

N = Número de moles

M = Masa molar

x_s = Fracción molar de la sal, en el agua de mar que alimenta a la planta

mientras que los subíndices son:

w = agua

s = sal

sw = agua de mar que alimenta a la planta

La masa molar del agua de mar se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$M_{sw} = \frac{m_{sw}}{N_{sw}} = \frac{N_s M_s + N_w M_w}{N_{sw}} = x_s M_s + x_w M_w \quad (6.2)$$

considerando:

M_s = Masa molar de la sal (58.5 kg/kmol)

M_w = Masa molar del agua (18 kg/kmol)

x_s = Fracción molar de la sal

x_w = Fracción molar del agua

$x_s + x_w = 1$

La fracción molar de la sal y el agua se calculan como se muestra a continuación:

$$x_s = \frac{M_w}{M_s \left(\frac{1}{m_{fs}} - 1 \right) + M_w} = \frac{18}{58.5 \left(\frac{1}{m_{fs}} - 1 \right) + 18} \quad (6.3.a)$$

$$x_w = \frac{M_s}{M_w \left(\frac{1}{m_{fw}} - 1 \right) + M_s} = \frac{58.5}{18 \left(\frac{1}{m_{fw}} - 1 \right) + 58.5} = 1 - x_s \quad (6.3.b)$$

Se puede considerar al agua de mar como una solución ideal con un error despreciable debido a que el efecto de moléculas distintas (a las moléculas de sal y agua) es muy pequeño.

Las propiedades extensivas de una mezcla son la suma de las propiedades de sus componentes individuales. Por lo tanto, la entalpía y la entropía de la mezcla (agua de mar) se obtienen de la siguiente forma (Cerci, 2002):

$$H_{sw} = m_s h_s + m_w h_w \quad (6.4.a)$$

$$S_{sw} = m_s s_s + m_w s_w \quad (6.4.b)$$

y las propiedades intensivas, por unidad de masa, son:

$$h_{sw} = m_{fs} h_s + m_{fw} h_w \quad (6.5.a)$$

$$s_{sw} = m_{fs} s_s + m_{fw} s_w \quad (6.5.b)$$

Para temperaturas distintas a la temperatura del punto muerto (T_0) se emplean las siguientes ecuaciones:

$$h_s = h_{s_0} + C_{p_s} (T - T_0) \quad (6.6.a)$$

$$s_s = s_{s_0} + C_{p_s} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \quad (6.6.b)$$

Se consideraron para la sal las siguientes propiedades:

$$C_{p_s} = 0.8368 \text{ [kJ/kgK]}$$

$$h_{s_0} = 29.288 \text{ [kJ/kg]}$$

$$S_{s_0} = 0.1009175 \text{ [kJ/kgK]}$$

La entropía molar de un componente de una mezcla ideal a P y T específicas es (Cengel, 1999):

$$\bar{s}_i = \bar{s}_{i,puro}(T, P) - R_u \ln x_i \quad (6.7)$$

donde:

R_u = Constante universal de los gases, kJ/kmol K

Como el término $R_u \ln x_i$ es negativo entonces la entropía de un componente dentro de una mezcla siempre será mayor que la entropía del componente si este se encontrara por separado a la misma T y P. Por tanto, la entropía de una mezcla salina es la suma de las entropías de la sal y del agua en la mezcla,

$$\begin{aligned} \bar{s} &= x_s \bar{s}_s + x_w \bar{s}_w = x_s [\bar{s}_{s,puro}(T, P) - R_u \ln x_s] + x_w [\bar{s}_{w,puro}(T, P) - R_u \ln x_w] = \\ &= x_s \bar{s}_{s,puro}(T, P) + x_w \bar{s}_{w,puro}(T, P) - R_u (x_s \ln x_s + x_w \ln x_w) \end{aligned} \quad (6.8)$$

La entropía del agua de mar por unidad de masa se determina dividiendo la cantidad anterior por la masa molar del agua de mar:

$$s = mf_s \bar{s}_{s,puro}(T, P) + mf_w \bar{s}_{w,puro}(T, P) - R_{sw} (x_s \ln x_s + x_w \ln x_w) \left[\frac{kJ}{kgK} \right] \quad (6.9)$$

donde:

R_{sw} = Constante de gas

La exergía de una corriente de flujo es (Cengel, 2011):

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) \quad (6.10)$$

y el flujo de exergía asociada con la corriente de fluido es:

$$\dot{X} = \dot{m} \psi = \dot{m} [(h - h_0) - T_0 (s - s_0)] \quad (6.11)$$

donde:

\dot{m} = gasto másico

Empleando las relaciones anteriores, se evaluó la exergía específica y el flujo de exergía en varios puntos de la planta identificados en la figura 6.1 y los datos que se obtuvieron se muestran en la tabla 6.1. La exergía del agua de mar a la entrada de la planta es cero debido a que está en el punto muerto y algunas exergías son negativas puesto que las propiedades en ese punto se encuentran por debajo de las del punto muerto.

El balance de exergía para todo tipo de sistema que se someta a cualquier proceso se expresa mediante la siguiente igualdad:

$$\dot{X}_{IN} - \dot{X}_{Out} - \dot{X}_{Destruida} = \Delta \dot{X}_{Sistema} \quad (6.12)$$

Para el caso de los sistemas en los que no se efectúa ninguna transferencia de energía mediante trabajo y calor (procesos adiabáticos) y se desarrollan de manera estable (sin cambio en la exergía del sistema), la relación anterior simplifica a:

$$\dot{X}_{Destruida} - \dot{X}_{IN \text{ en la masa}} - \dot{X}_{Out \text{ en la masa}} = \Delta \dot{X}_{Sistema} \quad (6.13)$$

La exergía destruida por cada componente es igual a la diferencia que existe entre la exergía que entra menos la exergía que sale de dicho componente, es decir:

$$\dot{X}_{DestruidaComponente} = \dot{X}_{IN \text{ al componente}} - \dot{X}_{Out \text{ del componente}} \quad (6.14)$$

Y fracción de exergía destruida dentro del componente se determina a partir de:

$$f_{Destruida} = \frac{\dot{X}_{Destruida \text{ en cada componente}}}{\dot{X}_{DestruidaTotal}} \quad (6.15)$$

6.1. Descripción de la planta

Para la elaboración del análisis se consideró una planta de EIME con una capacidad de producción de 200 kg/s (17,280 m³/día) de una sola unidad de que consta de 22 etapas, 3 de ellas de calentamiento y las 19 etapas restantes son de rechazo de calor. El diagrama de la planta se muestra en la figura 6.1.

El agua de mar que alimenta a la planta entra con un gasto másico de 1,762 kg/s, a una temperatura de 25 °C y presión atmosférica, con una salinidad de 35,000 ppm. De la cantidad de agua que alimenta a la planta la mayor parte de ella (1,168 kg/s) es utilizada como refrigerante en las últimas etapas del proceso, aumentando su temperatura de 25 a 33.3 °C para que posteriormente sea descargada de nueva cuenta al mar, los otros 594 kg/s son adicionados con productos químicos para que de manera inmediata puedan ser suministrados a las cámaras de evaporación instantánea. Dentro de la cámara de evaporación, la mezcla se encuentra a 33.3 °C con una salinidad de 48,795 ppm y se bombea a través de la zona de recuperación de calor donde su temperatura se incrementa hasta los 75 °C, para finalmente recibir un último incremento de 5.8 °C en su temperatura dentro del calentador de salmuera, el cual trabaja con vapor a 98.9 °C que condensa con un gasto másico de 27.54 kg/s. La salmuera al salir del calentador comienza a evaporarse a través de las diversas cámaras a medida que se disminuye paulatinamente su presión de 635 kPa a 8 kPa.

El vapor que condensa a lo largo de todo el proceso es recolectado y extraído de la planta como producto con un gasto másico de 200 kg/s, al mismo tiempo que la salmuera de desecho sale de la planta con una salinidad de 52,758 ppm y con un gasto másico de 394 kg/s.

Las propiedades del estado muerto son:

$$\begin{aligned} T_0 &= 298 [K] \\ P_0 &= 1 [atm] = 101.325 [kPa] \\ Salinidad_0 &= 35,000 [ppm] = 3.5\% \end{aligned}$$

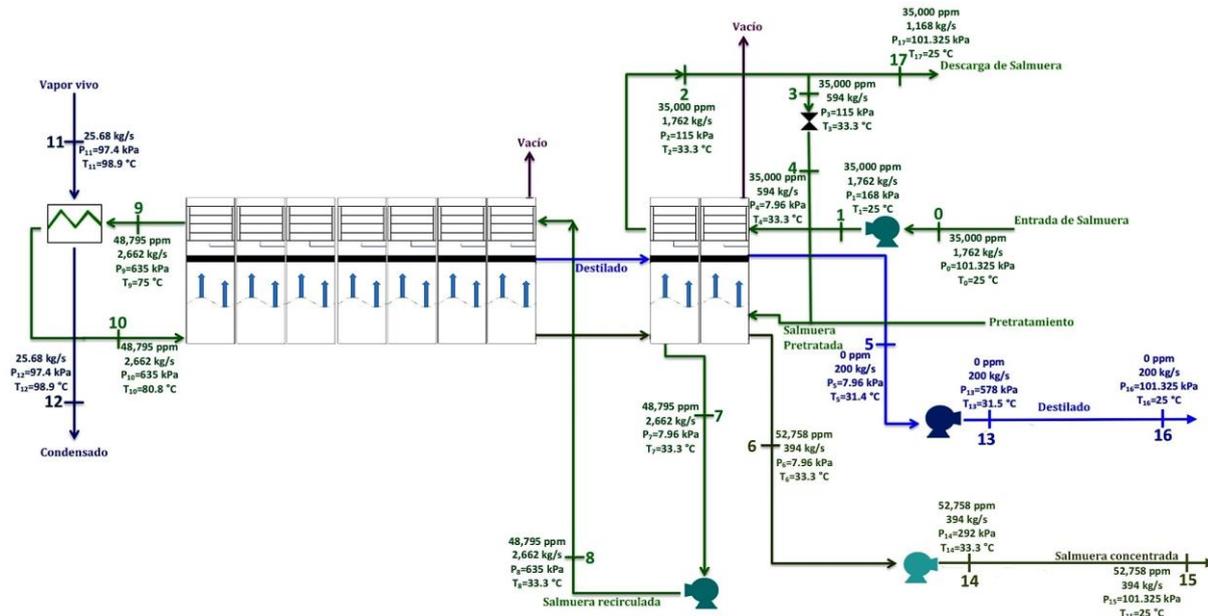


Figura 6.1. Diagrama de la planta EIME, con las propiedades de los puntos analizados.

Las propiedades de la planta se muestran en la tabla 6.1, junto a los datos obtenidos durante el análisis.

Tabla 6.1. Propiedades de la planta EIME analizada.

Edo.	T [K]	T [°C]	P [kPa]	Salinidad [ppm]	\dot{m} [kg/s]	h_s [kJ/kg]	s_s [kJ/kgK]	h_w [kJ/kg]	s_w [kJ/kgK]	mf_s	mf_w	h_{sw} [kJ/kg]	s_{sw} [kJ/kgK]	x_s	x_w	S_{mez} [kJ/kgK]	ψ [kJ/kg]	\dot{X} [kW]	E [kW]
0	298.00	25.00	101.33	35,000	1,762	29.288	0.1009	104.920	0.3670	0.035	0.965	102.273	0.3577	0.011	0.989	0.3851	0.000	0.0	0.0
1	298.00	25.00	168	35,000	1,762	29.288	0.1009	104.982	0.3670	0.035	0.965	102.333	0.3577	0.011	0.989	0.3851	0.060	105.420	105.420
2	306.30	33.30	115	35,000	1,762	36.233	0.1239	139.627	0.4820	0.035	0.965	136.008	0.4695	0.011	0.989	0.4968	0.425	748.901	59,441.679
3	306.30	33.30	115	35,000	594	36.233	0.1239	139.627	0.4820	0.035	0.965	136.008	0.4695	0.011	0.989	0.4968	0.425	252.467	20,038.795
4	306.30	33.30	7.96	35,000	594	36.233	0.1239	139.529	0.4820	0.035	0.965	135.914	0.4695	0.011	0.989	0.4968	0.330	196.292	19,982.621
5	304.40	31.40	7.96	0.0	200	0.0	0.0	131.589	0.4560	0.0	1.0	131.589	0.4560	0.0	1.0	0.4560	8.179	1,635.768	5,863.224
6	306.30	33.30	7.96	52,758	394	36.233	0.1239	139.529	0.4820	0.053	0.947	134.079	0.4631	0.017	0.983	0.5012	-2.796	-1,101.708	12,531.742
7	306.30	33.30	7.96	48,795	2,662	36.233	0.1239	139.529	0.4820	0.049	0.951	134.489	0.4645	0.016	0.984	0.5003	-2.126	-5,659.881	85,758.495
8	306.30	33.30	635	48,795	2,662	36.233	0.1239	140.097	0.4820	0.049	0.951	135.029	0.4645	0.016	0.984	0.5003	-1.586	-4,221.644	87,196.732
9	348.00	75.00	635	48,795	2,662	71.128	0.23071	314.511	1.0150	0.049	0.951	302.635	0.9767	0.016	0.984	1.0125	13.383	35,626.852	533,364.300
10	353.80	80.80	635	48,795	2,662	75.981	0.2445	338.837	1.0850	0.049	0.951	326.011	1.0440	0.016	0.984	1.0798	16.716	44,498.165	595,590.777
11	371.90	98.90	97.4	0.0	25.68	0.0	0.0	2,673.85	7.3670	0.0	1.0	2,673.85	7.3670	0.0	1.0	7.3670	482.804	12,398.404	66,038.152
12	371.90	98.90	97.4	0.0	25.68	0.0	0.0	2,673.85	7.3670	0.0	1.0	2,673.85	7.3670	0.0	1.0	7.3670	0.0	0.0	66,038.152
13	304.50	31.50	578	0.0	200	0.0	0.0	132.525	0.4570	0.0	1.0	132.525	0.4570	0.0	1.0	0.4570	8.817	1,763.368	6,050.424
14	306.30	33.30	292	52,758	394	36.233	0.1239	139.787	0.4820	0.053	0.947	134.324	0.4631	0.017	0.983	0.5012	-2.552	-1,005.419	12,628.031
15	298.00	25.00	101.33	52,758	394	29.288	0.1009	104.920	0.3670	0.053	0.947	100.930	0.3530	0.017	0.983	0.3910	-3.122	-1,230.202	-529.171
16	298.00	25.00	101.33	0.0	200	0.0	0.0	104.920	0.3670	0.0	1.0	104.920	0.3670	0.0	1.0	0.3670	8.032	1,606.368	529.424
17	298.00	25.00	101.33	35,000	1,168	29.288	0.1009	104.920	0.3670	0.035	0.965	102.273	0.3577	0.011	0.989	0.3851	0.0	0.000	0.000

6.2 Resultados numéricos

Utilizando las ecuaciones mostradas anteriormente, se analizó la planta EIME bajo los siguientes criterios:

- (1) El vapor evacuado por el condensador barométrico que proporciona vacío en el sistema EIME no se tomó en cuenta.
- (2) La eficiencia de las bombas se consideró de un 75%.
- (3) La temperatura del agua de mar que alimenta a la planta es de 298 K, misma que se empleó como temperatura ambiente para todos los cálculos.
- (4) Todos los componentes del sistema operan de manera constante.

- (5) La salinidad del agua de mar a la entrada de la planta es considerada como constante.
- (6) Las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de fluidos no se consideraron debido a su bajo valor.
- (7) El agua de mar se considera como una solución ideal.
- (8) La sal, el agua y el agua de mar son sustancias incompresibles.

Los resultados del análisis se obtuvieron con ayuda del software EES y Excel.

En el intercambiador de calor, el agua salina es calentada por vapor saturado a 98.9 °C aumentando su temperatura de 348 K a 353.8 K con un gasto másico de 2,662 kg/s, ver figura 6.2. El vapor sale del intercambiador de calor a la misma temperatura que el líquido saturado. Mediante un balance de energía en el intercambiador de calor se obtuvo una tasa de condensación de vapor de 27.54 kg/s y una tasa de transferencia de calor del vapor al agua salina de:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{IN_{vapor}} &= \dot{m}_{vapor} \times h_{fg,98.9^{\circ}C} \\ \dot{Q}_{IN_{vapor}} &= 27.54 \frac{kg}{s} \times 2260 \frac{kJ}{kg} \\ \dot{Q}_{IN_{vapor}} &= 62,240.400 \left[\frac{kJ}{s} \right] \end{aligned}$$

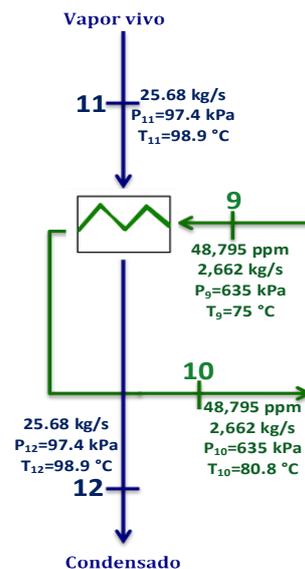


Figura 6.2. Esquema del intercambiador de calor de la planta EIME.

Tomando la temperatura del punto muerto como $T_0=25^{\circ}C = 298 K$, la tasa de suministro de exergía por el vapor es:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{IN_{vapor}} &= \dot{m}_{vapor} (\Delta h - T_0 \Delta s = h_{fg} - T_0 s_{fg}) \\ \dot{X}_{IN_{vapor}} &= 27.54 \frac{kg}{s} \times \left[2260 \frac{kJ}{kg} - (298 K) \left(6.073 \frac{kJ}{kgK} \right) \right] \\ \dot{X}_{IN_{vapor}} &= 12,397.602 \left[\frac{kJ}{s} \right] \end{aligned}$$

En el diseño de esta planta intervienen 4 bombas, cuya ubicación se indica en la figura 6.1. La eficiencia de estas bombas se puede definir como la relación entre la energía mecánica transferida al fluido (para este caso, que es el aumento en la exergía del fluido en este caso) y la energía eléctrica consumida. La energía mecánica que las bombas transmiten al fluido repercute en un aumento en la exergía del mismo, la tasa total del aumento en la exergía de las distintas corrientes de fluido es igual a la suma de los incrementos de exergía en cada una de las bombas y se determina de la siguiente manera:

$$\Delta\dot{X}_{Bombas} = \Delta\dot{X}_{Bomba_{alimentación}} + \Delta\dot{X}_{Bomba_{destilado}} + \Delta\dot{X}_{Bomba_{salmuera}} + \Delta\dot{X}_{Bomba_{recirculación}}$$

$$\Delta\dot{X}_{Bombas} = (\dot{X}_1 - \dot{X}_0) + (\dot{X}_{13} - \dot{X}_5) + (\dot{X}_{14} - \dot{X}_6) + (\dot{X}_8 - \dot{X}_7)$$

$$\Delta\dot{X}_{Bombas} = \{(105.420 - 0) + (1,763.368 - 1,635.768) + [-1,005.419 - (-1,101.708)] + [4,221.644 - (-5,659.881)]\} [kW]$$

$$\Delta\dot{X}_{Bombas} = 1,767.547 [kW]$$

Para una eficiencia de las bombas de 75%, la exergía suministrada en forma de energía eléctrica es:

$$\eta_{Bombas} = 75\%$$

$$\Delta\dot{X}_{IN_{Bombas}} = \frac{\Delta\dot{X}_{Bombas}}{\eta_{Motor_{Bombas}}}$$

$$\Delta\dot{X}_{IN_{Bombas}} = \frac{1,767.547}{0.75}$$

$$\Delta\dot{X}_{IN_{Bombas}} = 2,356.729 [kW]$$

Por tanto, la exergía total que se le suministra a la planta EIME es:

$$\dot{X}_{IN_{Total}} = \dot{X}_{IN_{Vapor}} + \dot{X}_{IN_{Bombas}}$$

$$\dot{X}_{IN_{Total}} = (12,397.602 + 2,356.729) [kW]$$

$$\dot{X}_{IN_{Total}} = 14,754.331 [kW]$$

Una vez conocida la exergía total que se le suministra a la planta, es necesario determinar la cantidad mínima de trabajo que se requiere para separar 594 kg/s de agua de mar a 25 ° C, 1 atm y una salinidad de 35,000 ppm en 200 kg/s de agua dulce (producto) con una salinidad de 0 ppm y 394 kg/s de agua salina (salmuera de rechazo) con una salinidad de 52,758 ppm a la misma temperatura y presión.

El trabajo mínimo que se requiere en un proceso adiabático de flujo constante, es la cantidad de trabajo que se requiere para un proceso adiabático reversible lo que es igual a la diferencia entre las exergías contenidas en las corrientes de entrada y salida de la planta (Cerci, 2002). La exergía del agua de mar que alimenta a la planta es cero, debido a que su estado se toma como el estado de referencia para los cálculos de exergía. Por lo tanto, para este caso:

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = \dot{X}_{\text{Salmuera concentrada y Destilado producido}} - \dot{X}_{\text{Agua de mar entrante}}$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = \dot{X}_{15} + \dot{X}_{16} - \dot{X}_0$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = (-1,230.202 + 1,606.368 - 0) \text{ [kW]}$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = \mathbf{376.166 \text{ [kW]}}$$

Este trabajo se debe plenamente a la composición de los flujos entrantes y salientes de la planta, debido a que dichos flujos se encuentran a la misma presión y temperatura.

La eficiencia de la planta EIME, se calcula con la ayuda de segunda ley de la termodinámica mediante la cual se relaciona la entrada de exergía mínima requerida, que equivale al trabajo mínimo que se requiere para la elaboración del proceso, con la exergía total que entra a la planta. Se expresa de la siguiente manera:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{X}_{IN\text{mínimo}}}{\dot{X}_{IN\text{Total}}} = \frac{\dot{W}_{\text{mínimo}}}{\dot{X}_{IN\text{Total}}}$$

$$\eta_{II} = \frac{376.166 \text{ kW}}{14,754.331 \text{ kW}}$$

$$\eta_{II} = \mathbf{2.55\%}$$

Esta ecuación nos indica que este proceso de desalación, con los gastos másicos y datos particulares de la planta, se podría efectuar con tan solo 376.166 kW de exergía (trabajo de entrada) en lugar de 14,574.331 kW. Por tal motivo, la tasa de destrucción exérgica (exergía desperdiciada) durante este proceso es:

$$\dot{X}_{\text{DestruídaTotal}} = \dot{X}_{IN\text{Total}} - \dot{X}_{IN\text{mínima}} = \dot{X}_{IN\text{Total}} - \dot{W}_{\text{mínimo}}$$

$$\dot{X}_{\text{DestruídaTotal}} = (14,754.331 - 376.166) \text{ [kW]}$$

$$\dot{X}_{\text{DestruídaTotal}} = \mathbf{14,378.164 \text{ [kW]}}$$

El análisis por segunda ley obtiene una mayor relevancia cuando se realiza a nivel componente, debido a que de esta forma se puede identificar los sitios de la planta en donde existe una mayor destrucción de exergía.

Para lo cual se emplea la ecuación 6.15, que para el caso de esta planta queda de la siguiente forma:

$$f_{\text{Destruída}} = \frac{\dot{X}_{\text{Destruída en cada componente}}}{\dot{X}_{\text{DestruídaTotal}}} = \frac{\dot{X}_{\text{Destruída en cada componente}}}{14,378.164 \text{ [kW]}}$$

La cantidad de exergía destruida en cada componente se calcula restando la cantidad de exergía que sale de la cantidad de exergía que entra a dicho componente. De este modo se determinaron las cantidades y fracciones de exergía destruidas en los diversos componentes de la planta.

En el caso de las bombas se tiene:

$$\dot{X}_{\text{DestruídaBombas}} = \dot{X}_{IN\text{Bombas}} - \Delta\dot{X}_{\text{Bombas}}$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Bombas}} = (2,356.729 - 1,767.547) [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Bombas}} = \mathbf{589.182 [kW]}$$

$$f_{Destruida_{Bombas}} = \frac{589.182 \text{ kW}}{14,378.164 \text{ kW}} = \mathbf{4.10\%}$$

Para las unidades de EIME:

$$\dot{X}_{Destruida_{EIME}} = (\dot{X}_1 + \dot{X}_4 + \dot{X}_8 + \dot{X}_{10}) - (\dot{X}_2 + \dot{X}_5 + \dot{X}_6 + \dot{X}_7 + \dot{X}_9)$$

$$\dot{X}_{Destruida_{EIME}} = \{[105.420 + 196.292 + (-4,221.644) + 44,498.165] - [748.901 + 1,635.768 + (-1,101.708) + (-5,659.881) + 35,626.852]\} [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{EIME}} = \mathbf{9,328.303 [kW]}$$

$$f_{Destruida_{EIME}} = \frac{9,328.303 \text{ kW}}{14,378.164 \text{ kW}} = \mathbf{64.88\%}$$

Para el calentador de salmuera:

$$\dot{X}_{Destruida_{CS}} = (\dot{X}_9 + \dot{X}_{11}) - (\dot{X}_{10} + \dot{X}_{12})$$

$$\dot{X}_{Destruida_{CS}} = [(35,626.852 + 12,398.404) - (44,498.165 + 0)] [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{CS}} = \mathbf{3,527.091 [kW]}$$

$$f_{Destruida_{CS}} = \frac{3,527.091 \text{ kW}}{14,378.164 \text{ kW}} = \mathbf{24.5\%}$$

Para el agua de alimentación al pasar por la válvula de estrangulación:

$$\dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} = \dot{X}_3 - \dot{X}_4$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} = (252.467 - 196.292) [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} = \mathbf{56.175 [kW]}$$

$$f_{Destruida_{Estrangulación}} = \frac{56.175 \text{ kW}}{14,378.164 \text{ kW}} = \mathbf{0.39\%}$$

Para el agua de mar descargada utilizada para la refrigeración (térmica):

$$\dot{X}_{Destruida_{Refrigeración}} = \dot{m}_{17}\psi_2 - \dot{X}_{17}$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Refrigeración}} = [(1,168 \times 0.425) - 0] [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Refrigeración}} = \mathbf{496.434 [kW]}$$

$$f_{Destruida_{Refrigeración}} = \frac{496.434 \text{ kW}}{14,378.164 \text{ kW}} = \mathbf{3.45\%}$$

Para la descarga de salmuera(térmica):

$$\dot{X}_{Destruida_{Descarga\ de\ salmuera}} = \dot{X}_{14} - \dot{X}_{15}$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Descarga\ de\ salmuera}} = [(-1,005.419) - (-1,230.202)] [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Descarga\ de\ salmuera}} = 224.782 [kW]$$

$$f_{Destruida_{Descarga\ de\ salmuera}} = \frac{224.782\ kW}{14,378.164\ kW} = 1.56\%$$

Para el agua producto (térmica):

$$\dot{X}_{Destruida_{Producto}} = \dot{X}_{13} - \dot{X}_{16}$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Producto}} = (1,763.368 - 1,606.368) [kW]$$

$$\dot{X}_{Destruida_{Producto}} = 157.000 [kW]$$

$$f_{Destruida_{Producto}} = \frac{157.000\ kW}{14,378.164\ kW} = 1.09\%$$

Después de realizado el análisis en toda la planta, se pudo conocer que la mayor cantidad de exergía destruida (64.88%) ocurre dentro de las unidades EIME. Los otros componentes que más destruyen exergía son el intercambiador de calor en el que se calienta la salmuera (24.5%), en las bombas (4.1%) y en la descarga de salmuera que se emplea para la refrigeración (3.45%). El 3.04% de exergía destruida restante, se lleva a cabo durante la estrangulación del agua de alimentación y las descargas de salmuera y de producto, ver tabla 6.2. En la figura 6.4 se muestra un diagrama con los flujos de exergía que interactúan en la planta EIME.

Tabla 6.2.
Resultados del análisis realizado a la planta EIME.

	Flujos de Exergía	Cantidad en [kW]	Cantidad en [%]
Exergía suministrada a la planta	Por el vapor	12,397.602	84.03
	Por las bombas	2,356.729	15.97
	Total	14,754.331	100.00
Exergía destruida	En las bombas	589.182	4.10
	En las unidades EIME	9,328.303	64.88
	En el calentador de salmuera	3,527.091	24.5
	En la válvula de estrangulación	56.175	0.39
	En la refrigeración	496.434	3.45
	En la salmuera	224.782	1.56
	En el producto	157.000	1.09
	Total	14,378.164	100.00
Trabajo mínimo de desalación ($\dot{W}_{mín.}$) = 376.166 [kW]			

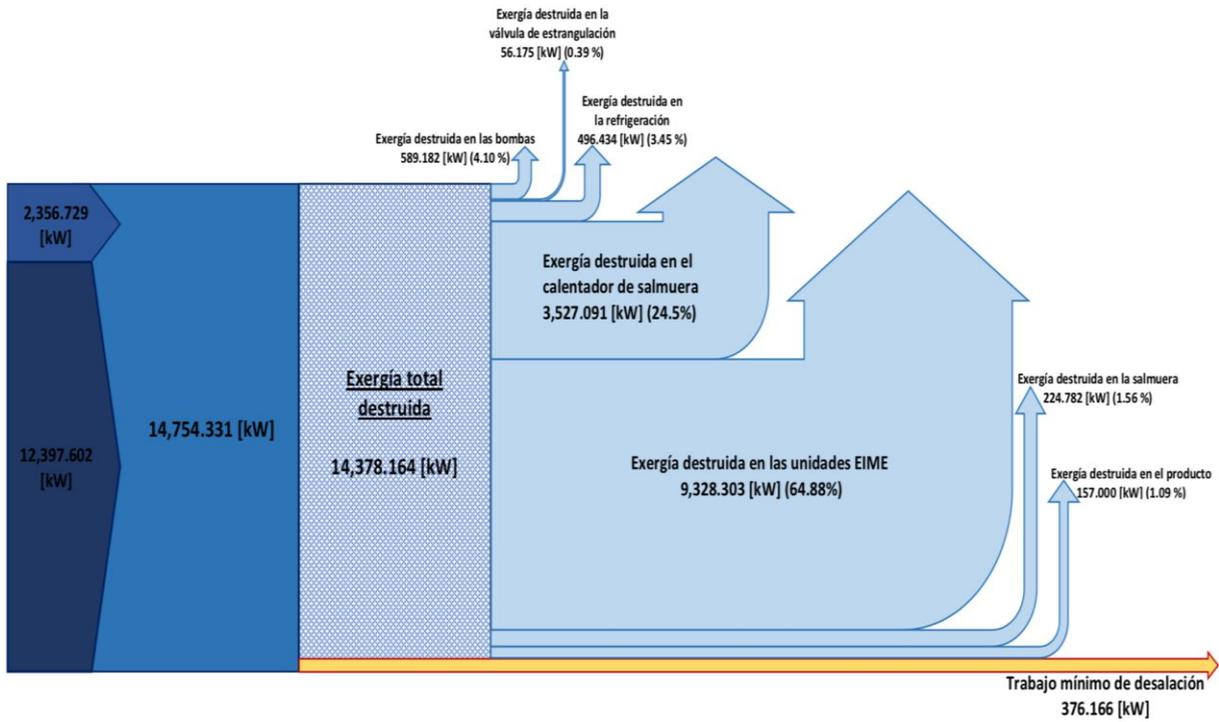


Figura 6.3. Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta EIME.

7. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UNA PLANTA DE EME

De la misma forma que se elaboró el análisis de la planta de EIME, siguiendo la misma metodología y con ayuda de las ecuaciones 6.1 a 6.15, se desarrolló un análisis para una planta de tipo EME. Debido a que no se contaban con datos reales de ninguna planta que se encuentre actualmente en operación, se realizó el diseño de una planta teórica implementando la metodología de diseño expuesta por H. T. El-Dessouky y H. M. Ettouney, en el libro “Fundamentals os salt water desalination”, los resultados del diseño de la planta se describen a continuación.

7.1. Descripción de la planta

Para la elaboración del análisis se consideró una planta de EME con una capacidad de producción de 200 kg/s (17,280 m³/día) de una sola unidad que consta de 8 etapas, en la primera de ellas se calienta la salmuera con vapor externo y las 7 etapas restantes son de rechazo de calor, la planta cuenta además con un condensador principal colocado al final de las etapas. El diagrama del funcionamiento básico de la planta se muestra en la figura 7.1.

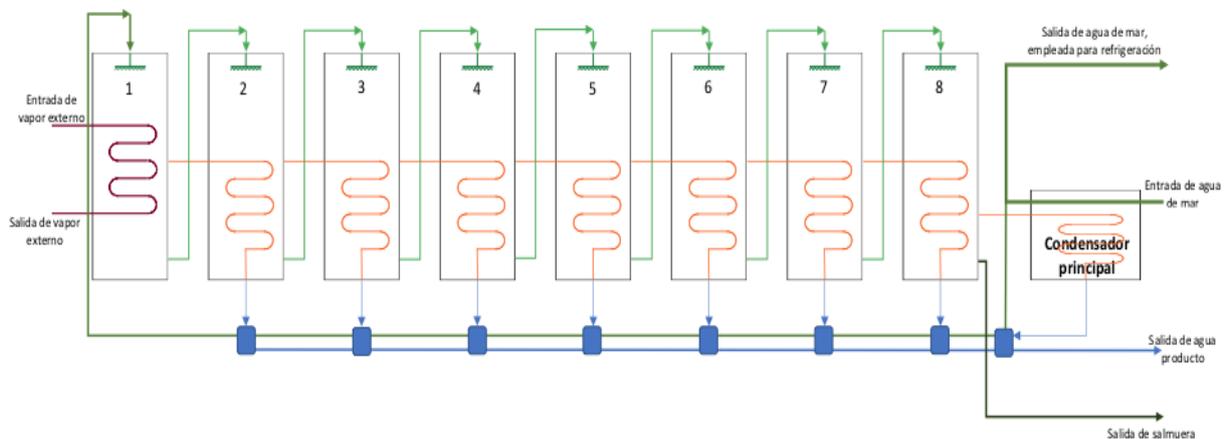


Figura 7.1. Diagrama de la planta EME, con los flujos de agua y vapor que entrada y salen de la planta.

El agua de mar que alimenta a la planta entra con una salinidad de 35,000 ppm, a 25°C de temperatura y presión atmosférica, con un gasto másico de 1,390.78 kg/s. De esta cantidad 990.78 kg/s se utilizan como refrigerante en el condensador principal, en donde pasa de 25 a 35 °C para posteriormente ser devuelta al mar, los otros 400 kg/s se hacen pasar por los condensadores de cada etapa, de donde salen a 55 °C, para posteriormente ingresar en la primera etapa del proceso donde reciben el calor que le proporciona el vapor externo, saliendo de la primera etapa a 95.73 °C, una presión de 5 kPa y una salinidad de 37,295 ppm. El vapor externo que calienta a la salmuera en la primera etapa del proceso entra a 100 °C con un gasto másico de 30.23 kg/s.

De la etapa 2 a la etapa 8, el agua de mar se evapora y condensa, disminuyendo su temperatura hasta los 44.87 °C, de la octava etapa salen tres flujos, el primero de ellos (24.32 kg/s) se hace pasar por el condensador principal para posteriormente volver a unir al segundo flujo (175.68 kg/s) en un unificador de destilado, el tercero flujo se trata de la salmuera de desecho que sale de la planta con un gasto másico de 200 kg/s y una salinidad de 70,000 ppm.

La figura 7.2 muestra el diagrama de la planta con las propiedades de los puntos que se emplearon para realizar el análisis.

Las propiedades del estado muerto son:

$$T_0 = 298 [K]$$

$$P_0 = 1 [atm] = 101.325[kPa]$$

$$Salinidad_0 = 35,000 [ppm] = 3.5\%$$

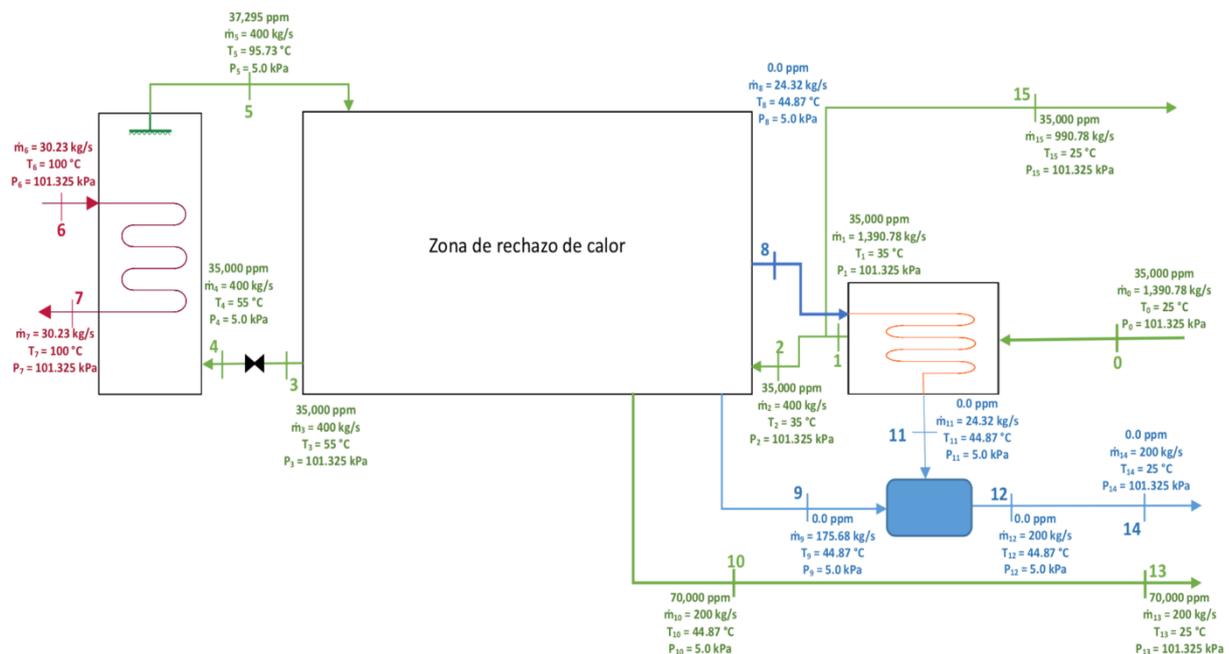


Figura 7.2. Diagrama de la planta EME, con las propiedades de los puntos analizados.

En la tabla 7.1 se enlistan las propiedades y los datos obtenidos durante el análisis de la planta.

Tabla 7.1.

Propiedades de la planta EME analizada.

Edo.	T [K]	T [°C]	P [kPa]	Salinidad [ppm]	\dot{m} [kg/s]	h_s [kJ/kg]	s_s [kJ/kgK]	h_w [kJ/kg]	s_w [kJ/kgK]	mf_s	mf_w	h_{sw} [kJ/kg]	s_{sw} [kJ/kgK]	x_s	x_w	s_{mez} [kJ/kgK]	Ψ [kJ/kg]	\dot{X} [kW]	E [kW]
0	298.00	25.00	101.325	35,000	1,390.78	29.288	0.1009	104.920	0.3670	0.035	0.965	102.273	0.3577	0.011	0.989	0.3851	0.0	0.0	0.0
1	308.00	35.00	101.325	35,000	1,390.78	37.656	0.1285	146.720	0.5050	0.035	0.965	142.903	0.4918	0.011	0.989	0.5192	0.657	913.947	56,507.225
2	308.00	35.00	101.325	35,000	400.0	37.656	0.1285	146.720	0.5050	0.035	0.965	142.903	0.4918	0.011	0.989	0.5192	0.657	262.859	16,251.952
3	328.00	55.00	101.325	35,000	400.0	54.392	0.1812	230.329	0.7680	0.035	0.965	224.171	0.7475	0.011	0.989	0.7748	5.746	2,298.232	48,759.330
4	328.00	55.00	5.0	35,000	400.0	54.392	0.1812	230.258	0.7680	0.035	0.965	224.103	0.7475	0.011	0.989	0.7748	5.677	2,270.826	48,731.924
5	368.73	95.73	5.0	37,295	400.0	88.475	0.279	401.166	1.2590	0.037	0.963	389.504	1.2225	0.012	0.988	1.2513	29.099	11,639.503	114,892.522
6	373.00	100.00	101.325	0.0	30.23	0.0	0.0	2,675.583	7.3550	0.0	1.0	2,675.583	7.3550	0.0	1.0	7.3550	496.271	15,002.267	77,791.165
7	373.00	100.00	101.325	0.0	30.23	0.0	0.0	2,675.583	7.3550	0.0	1.0	2,675.583	7.3550	0.0	1.0	7.3550	0.0	0.0	77,791.165
8	317.87	44.87	5.0	0.0	24.32	0.0	0.0	2,582.193	8.1660	0.0	1.0	2,582.193	8.1660	0.0	1.0	8.1660	161.203	3,920.453	60,311.657
9	317.87	44.87	5.0	0.0	175.68	0.0	0.0	187.893	0.6370	0.0	1.0	187.893	0.6370	0.0	1.0	0.6370	10.545	1,852.517	15,041.743
10	317.87	44.87	5.0	70,000	200.0	45.915	0.1549	187.893	0.6370	0.070	0.930	177.95	0.6033	0.023	0.977	0.6508	-3.508	-701.698	15,136.335
11	317.87	44.87	5.0	0.0	24.32	0.0	0.0	187.893	0.6370	0.0	1.0	187.89	0.6370	0.0	1.0	0.6370	10.545	256.450	2,082.281
12	317.87	44.87	5.0	0.0	200.0	0.0	0.0	187.893	0.6370	0.0	1.0	187.893	0.6370	0.0	1.0	0.6370	10.545	2,108.968	17,124.024
13	298.00	25.00	101.325	70,000	200.0	29.288	0.1009	104.830	0.3670	0.070	0.930	99.542	0.3484	0.023	0.977	0.3959	-5.966	-1,193.288	-546.164
14	298.00	25.00	101.325	0.0	200.0	0.0	0.0	104.920	0.3670	0.0	1.0	104.920	0.3670	0.0	1.0	0.3670	8.032	1,606.368	529.424
15	298.00	25.00	101.325	35,000	990.78	29.288	0.1009	104.920	0.3670	0.035	0.965	102.273	0.3577	0.011	0.989	0.3851	0.000	0.0	0.0

7.2 Resultados numéricos

El análisis de la planta EME se realizó considerando los siguientes criterios:

- (1) No se consideró el uso de ninguna bomba durante el proceso.
- (2) La temperatura del agua de alimentación de la planta es de 298 K, misma que se empleó como temperatura ambiente para todos los cálculos.
- (3) Todos los componentes del sistema operan de manera constante.
- (4) La salinidad del agua de mar a la entrada de la planta se consideró constante.
- (5) Las energías cinéticas y potenciales de las corrientes de fluidos se despreciaron debido a su bajo valor.
- (6) El agua de mar se consideró como una solución ideal.

Los resultados del análisis fueron obtenidos con ayuda del software EES y Excel.

En la primera etapa del proceso la temperatura del agua de mar aumenta de 328 K a 368.73 K con un gasto másico de 400 kg/s, ver figura 7.3. Un balance de energía en esta etapa mostró una tasa de condensación de vapor de 34.4 kg/s y una tasa de transferencia de calor del vapor al agua salina de:

$$\dot{Q}_{IN_{vapor}} = \dot{m}_{vapor} \times h_{fg,95.73\text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\dot{Q}_{IN_{vapor}} = 34.4 \frac{kg}{s} \times 2,267.859 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_{IN_{vapor}} = 78,014.350 \left[\frac{kJ}{s} \right]$$

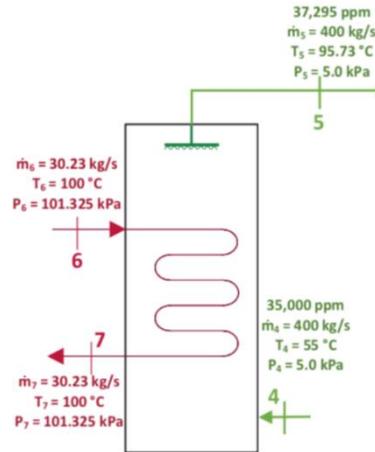


Figura 7.3. Esquema de la primera etapa de la planta EME.

La tasa de exergía que suministra el vapor es de:

$$\dot{X}_{IN_{vapor}} = \dot{m}_{vapor}(\Delta h - T_0\Delta s = h_{fg} - T_0s_{fg})$$

$$\dot{X}_{IN_{vapor}} = 34.4 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \times \left[2267.859 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - (298 \text{ K}) \left(6.147 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \right]$$

$$\dot{X}_{IN_{vapor}} = 15,000.223 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right]$$

Debido a que en el diseño de la planta no se consideró el uso de ninguna bomba, el flujo total de exergía que entra en la planta está dado por la cantidad de exergía contenida en el vapor que ingresa en la primera etapa:

$$\dot{X}_{IN_{Total}} = \dot{X}_{IN_{Vapor}}$$

$$\dot{X}_{IN_{Total}} = 15,000.223 \text{ [kW]}$$

La cantidad mínima de trabajo que se requiere para separar 400 kg/s de agua de mar a 25°C, 1 atm y una salinidad de 35,000 ppm en 200 kg/s de agua dulce (producto) con salinidad cero y 200 kg/s de agua salina (salmuera de rechazo) con una salinidad de 70,000 ppm a la misma temperatura y presión, es:

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = \dot{X}_{\text{Salmuera concentrada y Destilado producido}} - \dot{X}_{\text{Agua de mar entrante}}$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = \dot{X}_{13} + \dot{X}_{14} - \dot{X}_0$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = [(-1,193.288) + 1,606.368 - 0] \text{ [kW]}$$

$$\dot{W}_{\text{mínimo}} = 413.080 \text{ [kW]}$$

El resultado del cálculo de la eficiencia de segunda ley de esta planta fue de:

$$\eta_{II} = \frac{\dot{X}_{IN_{\text{mínimo}}}}{\dot{X}_{IN_{Total}}} = \frac{\dot{W}_{\text{mínimo}}}{\dot{X}_{IN_{Total}}}$$

$$\eta_{II} = \frac{413.080}{15,000.223}$$

$$\eta_{II} = 2.75\%$$

La tasa de exergía destruida durante este proceso es:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Total}} &= \dot{X}_{IN_{Total}} - \dot{X}_{IN_{mínima}} = \dot{X}_{IN_{Total}} - \dot{W}_{mínimo} \\ \dot{X}_{Destruida_{Total}} &= (15,000.223 - 413.080) [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Total}} &= \mathbf{14,587.143 [kW]}\end{aligned}$$

Para el caso de esta planta, la fracción de exergía destruida en cada uno de los componentes que la conforman se calcula de la siguiente manera:

$$f_{Destruida} = \frac{\dot{X}_{Destruida \text{ en cada componente}}}{\dot{X}_{Destruida_{Total}}} = \frac{\dot{X}_{Destruida \text{ en cada componente}}}{14,587.143 [kW]}$$

Las cantidades de exergía destruida y sus respectivas fracciones de los diversos componentes de la planta son:

Para la zona de rechazo de calor:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{ZR}} &= (\dot{X}_2 + \dot{X}_5) - (\dot{X}_3 + \dot{X}_8 + \dot{X}_9 + \dot{X}_{10}) \\ \dot{X}_{Destruida_{ZR}} &= \{(262.859 + 11,639.503) - [2,298.232 + 3,920.453 + 1,852.517 \\ &\quad + (-701.698)]\} [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{ZR}} &= \mathbf{4,532.857 [kW]} \\ f_{Destruida_{ZR}} &= \frac{4,532.857 \text{ kW}}{14,587.143 \text{ kW}} = \mathbf{31.07\%}\end{aligned}$$

Para la zona de calentamiento de salmuera (etapa 1):

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{ZCS}} &= (\dot{X}_4 + \dot{X}_6) - (\dot{X}_5 + \dot{X}_7) \\ \dot{X}_{Destruida_{ZCS}} &= [(2,270.826 + 15,002.267) - (11,639.503 + 0)] [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{ZCS}} &= \mathbf{5,633.591 [kW]} \\ f_{Destruida_{ZCS}} &= \frac{5,633.591 \text{ kW}}{14,587.143 \text{ kW}} = \mathbf{38.62\%}\end{aligned}$$

Para el condensador principal:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{CP}} &= (\dot{X}_0 + \dot{X}_8) - (\dot{X}_1 + \dot{X}_{11}) \\ \dot{X}_{Destruida_{CP}} &= [(0 + 3,920.453) - (913.947 + 256.450)] [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{CP}} &= \mathbf{2,750.056 [kW]} \\ f_{Destruida_{CP}} &= \frac{2,750.056 \text{ kW}}{14,587.143 \text{ kW}} = \mathbf{18.85\%}\end{aligned}$$

Para la válvula de estrangulación:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{DestruidaEstrangulación} &= \dot{X}_3 - \dot{X}_4 \\ \dot{X}_{DestruidaEstrangulación} &= (2,298.232 - 2,270.826) [kW] \\ \dot{X}_{DestruidaEstrangulación} &= \mathbf{27.406 [kW]} \\ f_{DestruidaCP} &= \frac{27.406 kW}{14,587.143 kW} = \mathbf{0.19\%}\end{aligned}$$

Para la descarga del agua de mar empleada para la refrigeración en el condensador principal (térmica):

$$\begin{aligned}\dot{X}_{DestruidaRefrigeración} &= \dot{m}_{15}\psi_1 - \dot{X}_{15} \\ \dot{X}_{DestruidaRefrigeración} &= [(990.78 \times 0.657) - 0] [kW] \\ \dot{X}_{DestruidaRefrigeración} &= \mathbf{651.088 [kW]} \\ f_{DestruidaCP} &= \frac{651.088 kW}{14,587.143 kW} = \mathbf{4.46\%}\end{aligned}$$

Para la descarga de salmuera (térmica):

$$\begin{aligned}\dot{X}_{DestruidaDescarga\ de\ salmuera} &= \dot{X}_{10} - \dot{X}_{13} \\ \dot{X}_{DestruidaDescarga\ de\ salmuera} &= [-701.698 - (-1,193.288)] [kW] \\ \dot{X}_{DestruidaDescarga\ de\ salmuera} &= \mathbf{491.590 [kW]} \\ f_{DestruidaCP} &= \frac{491.590 kW}{14,587.143 kW} = \mathbf{3.37\%}\end{aligned}$$

Para el agua producto (térmica):

$$\begin{aligned}\dot{X}_{DestruidaProducto} &= \dot{X}_{12} - \dot{X}_{14} \\ \dot{X}_{DestruidaProducto} &= (2,108.968 - 1,606.368) [kW] \\ \dot{X}_{DestruidaProducto} &= \mathbf{502.600 [kW]} \\ f_{DestruidaCP} &= \frac{502.600 kW}{14,587.143 kW} = \mathbf{3.45\%}\end{aligned}$$

El análisis de esta planta mostró que la mayor cantidad de exergía destruida (38.62%) ocurre dentro en la primera etapa del proceso, al momento de calentar el agua de mar, y en la zona de rechazo de calor (etapas 2-8) se destruye el 31.07% de exergía. El otro componente que más destruye exergía es el condensador principal (18.85%), en el flujo de agua de mar empleado para la refrigeración se destruye el 4.46% de exergía, mientras que en el flujo del agua producto y el flujo de salmuera de desecho se destruye casi la misma cantidad de exergía (3.45 y 3.37%, respectivamente). El componente que menos exergía destruye es la válvula de estrangulación

con 0.19% del total de la exergía destruida, ver tabla 7.2. En la figura 7.4 se muestra un diagrama con los flujos de exergía que interactúan en la planta EME.

Tabla 7.2.
Resultados del análisis realizado a la planta EME.

	Flujos de Exergía	Cantidad en [kW]	Cantidad en [%]
Exergía suministrada a la planta	Por el vapor	15,000.223	100.00
	Total	15,000.223	100.00
Exergía destruida	En la zona de rechazo de calor	4,532.857	31.07
	En la zona de calentamiento de salmuera	5,633.591	38.62
	En el condensador principal	2,750.056	18.85
	En la válvula de estrangulación	27.406	0.19
	En la refrigeración	651.088	4.46
	En la salmuera	491.590	3.37
	En el producto	502.600	3.45
	Total	14,587.143	100.00
Trabajo mínimo de desalación ($\dot{W}_{mín.}$) = 413.080 [kW]			

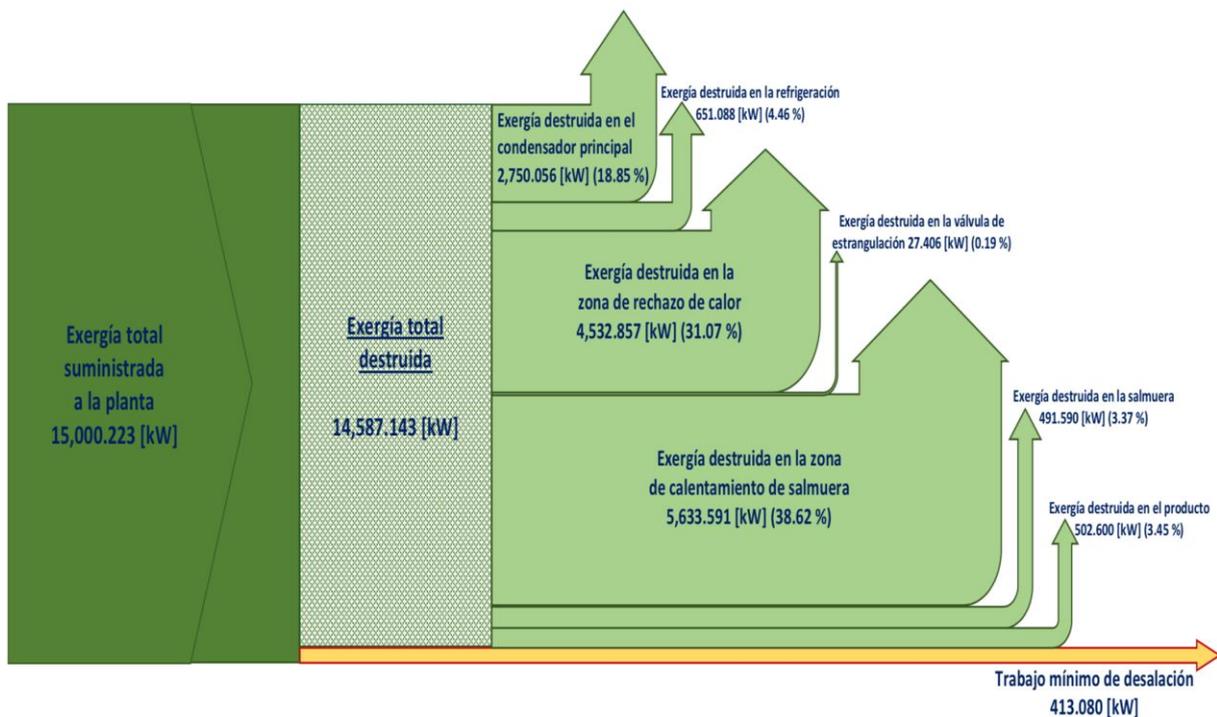


Figura 7.4. Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta EME.

8. ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE UNA PLANTA DE OI

El análisis realizado a una planta de OI resultó más simple en su elaboración que el análisis de las plantas EIME y EME, esto es debido a que se trata de un proceso de desalación mediante filtración y no un proceso de desalación térmico, por lo cual, los valores de entalpía y entropía de la sal no varían durante el proceso lo que simplifica significativamente los cálculos del análisis. Al igual que en los dos casos anteriores, se emplearon datos de operación teóricos para el análisis de la planta, los cuales se describen a continuación.

8.1. Descripción de la planta

Se realizó el análisis de una planta de OI con una capacidad de producción de 87.80 kg/s (7,586 m³/día), el agua de mar ingresa a la planta a través de una bomba de baja presión que se encarga de aumentar hasta 650 kPa la presión del agua, para prevenir el ingreso de materiales indeseables, el agua de alimentación se hace pasar por un conjunto de filtros de los cuales se desprenden dos flujos, el primero de ellos se envía a un mezclador, pasando previamente por una válvula de estrangulación que disminuye su presión a 180 kPa y el segundo flujo ingresa a una bomba de alta presión en donde incrementa su presión hasta 6,000 kPa, que es la presión que requiere esta planta para realizar el proceso de ósmosis inversa dentro del módulo de membranas. Del módulo de membranas salen nuevamente dos flujos, uno de ellos es el agua desalada que debido a su bajo contenido de sales se tiene que introducir a un mezclador para que se obtenga la salinidad adecuada que se requiere en el producto final mientras que el otro flujo se trata de la salmuera de rechazo, el cual se envía a una turbina para aprovechar la energía que se encuentra contenida dentro de ese flujo, debido a la alta presión a la que sale del proceso de filtración.

El diagrama de la planta, así como las propiedades de todos los puntos que se utilizaron para la realización del análisis se pueden observar en la figura 8.1.

Las propiedades que se consideraron para el estado muerto son:

$$T_0 = 293 [K]$$

$$P_0 = 1 [atm] = 101.325[kPa]$$

$$Salinidad_0 = 35,000 [ppm] = 3.5\%$$

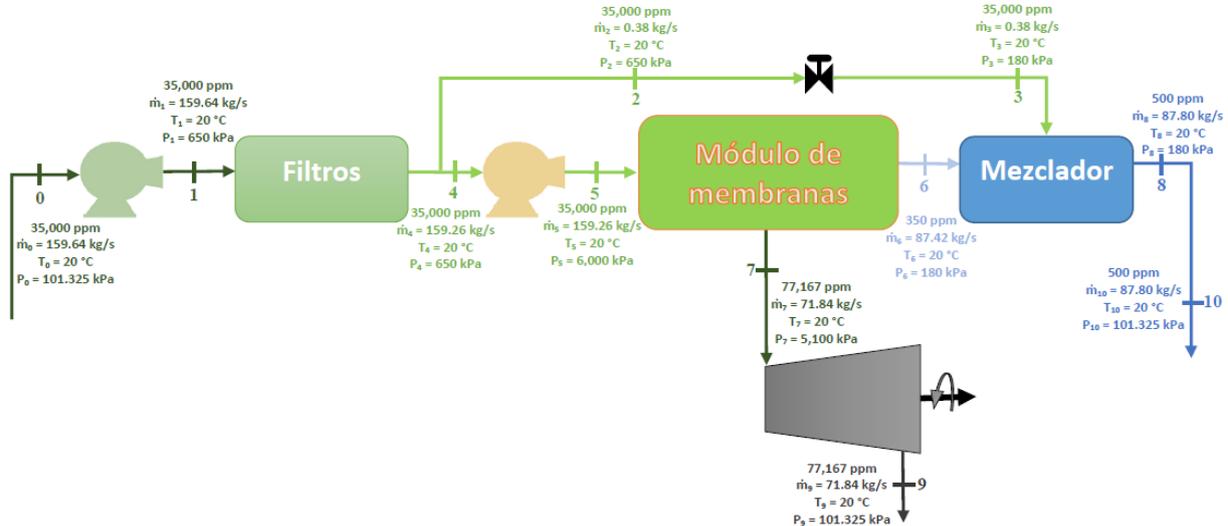


Figura 8.1. Diagrama de la planta OI, con las propiedades de los puntos analizados.

Las propiedades y todos los datos que se obtuvieron durante el análisis de la planta se enlistan en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Propiedades de la planta de OI analizada.

Edo.	T [K]	T [°C]	P [kPa]	Salinidad [ppm]	\dot{m} [kg/s]	h_s [kJ/kg]	s_s [kJ/kgK]	h_w [kJ/kg]	s_w [kJ/kgK]	mf_s	mf_w	h_{sw} [kJ/kg]	s_{sw} [kJ/kgK]	x_s	x_w	S_{mez} [kJ/kgK]	Ψ [kJ/kg]	\dot{X} [kW]	E [kW]
0	293	20.00	101.325	35,000	159.6	29.288	0.10092	83.930	0.2962	0.03500	0.96500	82.018	0.2894	0.01105	0.98895	0.3167	0.00	0.0	0.0
1	293	20.00	650	35,000	159.6	29.288	0.10092	84.440	0.2961	0.03500	0.96500	82.510	0.2893	0.01105	0.98895	0.3166	0.520	83.083	78.567
2	293	20.00	650	35,000	0.38	29.288	0.10092	84.440	0.2961	0.03500	0.96500	82.510	0.2893	0.01105	0.98895	0.3166	0.520	0.198	0.187
3	293	20.00	180	35,000	0.38	29.288	0.10092	84.000	0.2962	0.03500	0.96500	82.085	0.2894	0.01105	0.98895	0.3167	0.068	0.026	0.026
4	293	20.00	650	35,000	159.3	29.288	0.10092	84.440	0.2961	0.03500	0.96500	82.510	0.2893	0.01105	0.98895	0.3166	0.520	82.885	78.380
5	293	20.00	6,000	35,000	159.3	29.288	0.10092	89.460	0.2949	0.03500	0.96500	87.354	0.2881	0.01105	0.98895	0.3155	5.704	908.452	849.883
6	293	20.00	180	350	87.42	29.288	0.10092	84.000	0.2962	0.00035	0.99965	83.981	0.2961	0.00011	0.99989	0.2966	7.853	686.476	171.634
7	293	20.00	5,100	77,167	71.84	29.288	0.10092	88.620	0.2951	0.07717	0.92283	84.042	0.2801	0.02510	0.97490	0.3314	-2.265	-162.727	145.404
8	293	20.00	180	500	87.80	29.288	0.10092	84.000	0.2962	0.00050	0.99950	83.973	0.2961	0.00015	0.99985	0.2968	7.797	684.585	171.659
9	293	20.00	101.325	77,167	71.84	29.288	0.10092	83.930	0.2962	0.07717	0.92283	79.713	0.2811	0.02510	0.97490	0.3324	-6.891	-495.035	-165.526
10	293	20.00	101.325	500	87.80	29.288	0.10092	83.930	0.2962	0.00050	0.99950	83.903	0.2961	0.00015	0.99985	0.2968	7.727	678.442	165.516

8.2 Resultados numéricos

El análisis de la planta de OI se realizó bajo los siguientes criterios:

- (1) Se trata de un proceso isotérmico por lo cual las entalpía y entropía de la sal es la misma durante todo el proceso.
- (2) La eficiencia de las bombas es de 75%.
- (3) La temperatura del agua de alimentación de la planta es de 293 K y esa misma temperatura se consideró para todos los cálculos como temperatura ambiente.
- (4) Todos los componentes del sistema operan de manera constante.
- (5) El agua de mar se consideró como una solución ideal.
- (6) La salinidad del agua de mar a la entrada de la planta se consideró constante.

Los resultados del análisis se obtuvieron empleando el software EES y Excel.

La sumatoria del incremento de la exergía de las bombas que operan en la planta es de:

$$\begin{aligned}\Delta\dot{X}_{Bombas} &= \Delta\dot{X}_{Bomba\ de\ baja\ presión} + \Delta\dot{X}_{Bomba\ de\ alta\ presión} \\ \Delta\dot{X}_{Bombas} &= (\dot{X}_1 - \dot{X}_0) + (\dot{X}_5 - \dot{X}_4) \\ \Delta\dot{X}_{Bombas} &= [(83.083 - 0) + (908.452 - 82.885)] [kW] \\ \Delta\dot{X}_{Bombas} &= \mathbf{908.649 [kW]}\end{aligned}$$

Debido a que las bombas trabajan con una eficiencia del 75%, la exergía suministrada a la planta en forma de energía eléctrica es:

$$\begin{aligned}\eta_{Bombas} &= 75\% \\ \Delta\dot{X}_{INBombas} &= \frac{\Delta\dot{X}_{Bombas}}{\eta_{Bombas}} \\ \Delta\dot{X}_{INBombas} &= \frac{908.65}{0.75} \\ \Delta\dot{X}_{INBombas} &= \mathbf{1,211.533 [kW]}\end{aligned}$$

Al tratarse de un proceso de desalación de agua mediante filtración no se requiere de ninguna fuente de alimentación de calor. Por lo cual, la exergía total suministrada a esta planta únicamente es aquella que se ingresa a través de las bombas, es decir:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{INTotal} &= \dot{X}_{INBombas} \\ \dot{X}_{INTotal} &= \mathbf{1,211.533 [kW]}\end{aligned}$$

Para que partiendo de una cantidad de 159.64 kg/s de agua de mar a presión atmosférica, temperatura de 20 °C y una salinidad de 35,000 ppm se pueda obtener un flujo de 87.80 kg/s de agua producto, con una salinidad de 500 ppm y un flujo de salmuera de rechazo de 71.84 kg/s, con una salinidad de 77,167 ppm, a la misma presión y temperatura, se requiere un trabajo mínimo de:

$$\begin{aligned}\dot{W}_{mínimo} &= \dot{X}_{Salmuera\ concentrada\ y\ Destilado\ producido} - \dot{X}_{Agua\ de\ mar\ entrante} \\ \dot{W}_{mínimo} &= \dot{X}_9 + \dot{X}_{10} - \dot{X}_0 \\ \dot{W}_{mínimo} &= [(-495.035) + 678.442 - 0] [kW] \\ \dot{W}_{mínimo} &= \mathbf{183.406 [kW]}\end{aligned}$$

Considerando los resultados anteriores, la eficiencia de segunda ley para esta planta fue:

$$\begin{aligned}\eta_{II} &= \frac{\dot{W}_{INmínimo}}{\dot{X}_{INTotal}} = \frac{\dot{W}_{mínimo}}{\dot{X}_{INTotal}} \\ \eta_{II} &= \frac{183.407}{1,211.533} \\ \eta_{II} &= \mathbf{15.14\%}\end{aligned}$$

Y la tasa de exergía destruida por la planta es:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Total}} &= \dot{X}_{IN_{Total}} - \dot{X}_{IN_{mínima}} = \dot{X}_{IN_{Total}} - \dot{W}_{mínimo} \\ \dot{X}_{Destruida_{Total}} &= (1,211.533 - 183.407) [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Total}} &= \mathbf{1,028.127 [kW]}\end{aligned}$$

Al igual que en los dos casos anteriores, la fracción de exergía destruida en cada uno de los componentes que conforman la planta se calculó de la siguiente manera:

$$f_{Destruida} \frac{\dot{X}_{Destruida \text{ en cada componente}}}{\dot{X}_{Destruida_{Total}}} = \frac{\dot{X}_{Destruida \text{ en cada componente}}}{1,028.127 [kW]}$$

La exergía destruida por cada componente que conforma la planta y la fracción que esta representa del total de la exergía destruida son:

Exergía destruida en las bombas:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Bombas}} &= \dot{X}_{IN_{Bombas}} - \Delta\dot{X}_{Bombas} \\ \dot{X}_{Destruida_{Bombas}} &= (1,211.533 - 908.65) [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Bombas}} &= \mathbf{302.883 [kW]} \\ f_{Destruida_{Bombas}} &= \frac{302.883 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{29.46 \%}\end{aligned}$$

Para el conjunto de filtros se obtuvo:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Filtros}} &= \dot{X}_1 - (\dot{X}_2 + \dot{X}_4) \\ \dot{X}_{Destruida_{Filtros}} &= [83.083 - (0.198 + 82.885)] [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Filtros}} &= \mathbf{0 [kW]}\end{aligned}$$

En la válvula de estrangulación:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} &= \dot{X}_2 - \dot{X}_3 \\ \dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} &= (0.198 - 0.026) [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Estrangulación}} &= \mathbf{0.172 [kW]} \\ f_{Destruida_{Estrangulación}} &= \frac{0.172 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{0.02 \%}\end{aligned}$$

Al momento de filtrar el agua, en el módulo de membranas la exergía que se destruye es:

$$\begin{aligned}\dot{X}_{Destruida_{Módulo de membranas}} &= \dot{X}_5 - (\dot{X}_6 + \dot{X}_7) \\ \dot{X}_{Destruida_{Módulo de membranas}} &= \{908.452 - [686.476 + (-162.727)]\} [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Módulo de membranas}} &= \mathbf{384.703 [kW]} \\ f_{Destruida_{Módulo de membranas}} &= \frac{384.703 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{37.42 \%}\end{aligned}$$

En el mezclador la destrucción de exergía es:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{Destruida_{Mezclador}} &= (\dot{X}_3 + \dot{X}_6) - \dot{X}_8 \\ \dot{X}_{Destruida_{Mezclador}} &= [(0.026 + 686.476) - 684.585] [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Mezclador}} &= \mathbf{1.917 [kW]} \\ f_{Destruida_{Mezclador}} &= \frac{1.917 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{0.19 \%} \end{aligned}$$

La cantidad de exergía destruida en la turbina es:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{Destruida_{Turbina}} &= \dot{X}_7 - \dot{X}_9 \\ \dot{X}_{Destruida_{Turbina}} &= [-162.727 - (-495.035)] [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Turbina}} &= \mathbf{332.308 [kW]} \\ f_{Destruida_{Turbina}} &= \frac{332.308 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{32.32 \%} \end{aligned}$$

En la salida del producto se destruye:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{Destruida_{Producto}} &= \dot{X}_8 - \dot{X}_{10} \\ \dot{X}_{Destruida_{Producto}} &= (684.585 - 678.442) [kW] \\ \dot{X}_{Destruida_{Producto}} &= \mathbf{6.143 [kW]} \\ f_{Destruida_{Producto}} &= \frac{6.143 \text{ kW}}{1,028.127 \text{ kW}} = \mathbf{0.60 \%} \end{aligned}$$

Con el análisis de la planta se logró conocer que el componente en el que más se destruye exergía es en el módulo de membranas (37.42 %), en la turbina se destruye la segunda cantidad más grande de exergía (32.32 %) y en las bombas se destruye prácticamente el resto de la exergía (29.46 %). La cantidad de exergía que se destruye en el flujo del agua producto, en la válvula de estrangulación y en el mezclador es mínima (0.8 %), mientras que en el conjunto de filtros no se destruye nada de exergía, ver tabla 8.2. En la figura 8.2 se muestra un diagrama con los flujos de exergía que interactúan en la planta de OI.

Tabla 8.2.
Resultados del análisis realizado a la planta de OI.

	Flujos de Exergía	Cantidad en [kW]	Cantidad en [%]
Exergía suministrada a la planta	Por las bombas	1,211.533	100.00
	Total	1,211.533	100.00
Exergía destruida	En las bombas	302.883	29.46
	En la válvula de estrangulación	0.172	0.02
	En el módulo de membranas	384.703	37.42
	En el mezclador	1.917	0.19
	En la turbina	332.308	32.32
	En el producto	6.143	0.60
	Total	1,028.127	100.00
Trabajo mínimo de desalación ($\dot{W}_{mín.}$) = 183.406 [kW]			

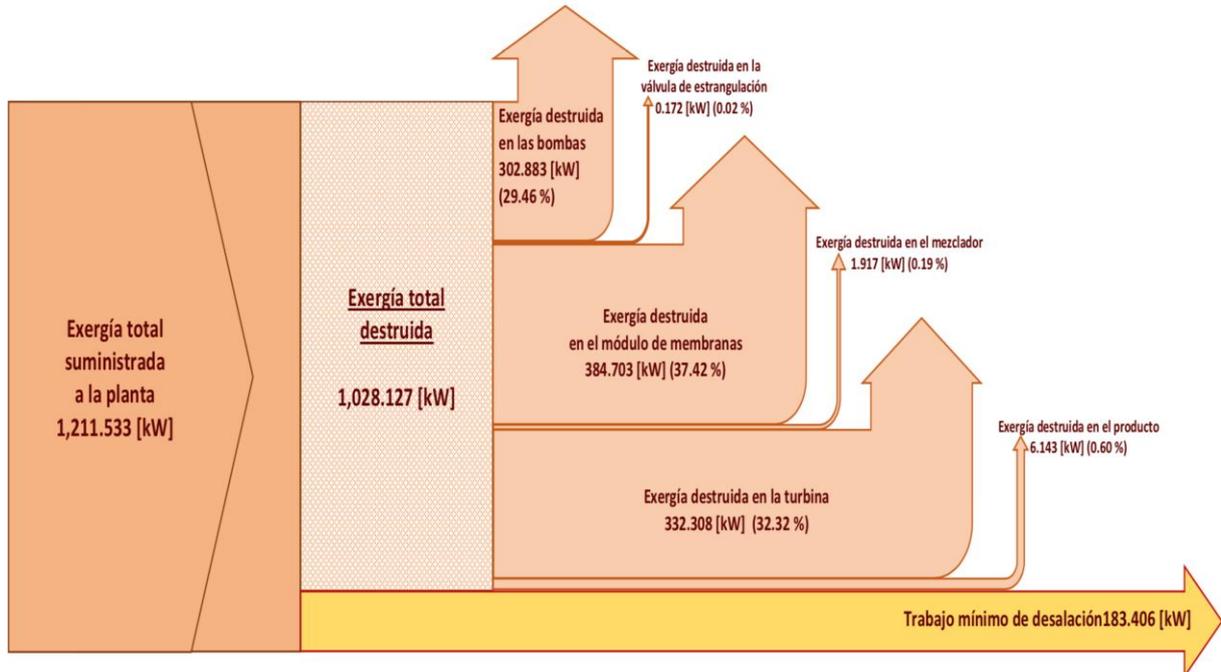


Figura 8.2. Diagrama de los flujos de exergía, con cantidad y porcentaje de la exergía destruida para la planta de OI.

CONCLUSIONES

En los tres casos analizados se obtuvieron valores de exergías negativos en algunos puntos del análisis, lo cual se debe a que cuando la corriente de un fluido, a lo largo de un proceso de desalación cualquiera, presenta una salinidad más elevada de la salinidad contenida en el agua de mar que alimenta el proceso, es necesario que se le aplique un trabajo para reducir su salinidad al nivel del estado muerto, por lo tanto, la exergía del flujo en ese punto resulta negativa. En caso contrario, cuando la salinidad de un fluido se encuentra por debajo de la salinidad del agua de alimentación, este fluido es capaz de producir un trabajo, al permitir la adición de sales hasta alcanzar la salinidad del estado muerto, lo que implica que su exergía sea positiva.

En el caso de las plantas EIME y EME, las eficiencias a las que trabajan (2.55% y 2.75%, respectivamente) resultaron ser bajas en comparación con las eficiencias que reportan actualmente algunas plantas de este tipo, las cuales llegan a registrar eficiencias muy próximas al 7% (Hamed, 2000), esto se debe a que en ambas plantas la cantidad de exergía que ingresa es muy superior a la cantidad de trabajo mínimo que se requiere para llevar a cabo el proceso de purificación del agua. El valor tan bajo obtenido en las eficiencias de estas plantas, el cual era de esperarse al tratarse de procesos intrínsecamente irreversibles, indica que en ambos procesos existen enormes oportunidades para implementar mejoras que eleven su rendimiento termodinámico. Las zonas de calentamiento de salmuera resultaron ser, para las dos plantas, zonas de gran destrucción de exergía (24.5 % para la planta EIME y 38.62 % para la planta EME, del total de la exergía destruida en cada planta), motivo por el cual resulta conveniente evaluar si la temperatura de entrada del vapor de calentamiento es la idónea para el proceso o es necesario trabajar con vapor de menor temperatura. Del mismo modo, el proceso de evaporación en las etapas de rechazo de calor presenta grandes ineficiencias, mismas que se pueden subsanar aumentando etapas en este proceso, para lo cual se debe evaluar la rentabilidad de esta modificación.

En la planta EIME, donde se consideró el uso de 4 bombas, se puede apreciar que aproximadamente el 16% de la exergía total que ingresa a la planta es suministrada por las bombas, esta cantidad es sin duda muy significativa y por tal motivo resulta evidente que el uso de bombas de alta eficiencia repercutirá positivamente en el costo final del destilado producido.

Se puede considerar que tanto la planta EME como la EIME, emplean vapor de calentamiento con una temperatura de 100 °C, por lo cual, es indeseable la obtención de este vapor mediante fuentes tradicionales de quema de combustible, puesto que de obtenerse por estos medios la

destrucción de exergía para la obtención del vapor resulta enorme. Por lo mismo, la implementación de plantas de purificación de agua a través de procesos térmicos resulta muy conveniente en instalaciones de cogeneración, en las cuales se emplea vapor a alta temperatura para la generación de la electricidad, logrando de este modo que el calentador de salmuera requerido en los procesos EIME y EME funcione como condensador de la planta de cogeneración. Otra excelente opción para disminuir la destrucción de exergía en estos procesos, es la implementación de energías renovables para la generación del vapor requerido para calentar la salmuera, el uso de estas fuentes también impactara de sobremanera en la reducción del costo de la producción del agua purificada debido a que no existiría ningún costo en el combustible empleado para el calentamiento de la salmuera durante todo el proceso.

Para el caso de la planta de OI, el valor de la eficiencia de segunda ley calculada (15%) resultó estar dentro del parámetro de las eficiencias reportadas por diversas plantas a nivel mundial, en las cuales su eficiencia oscila entre 10-20% (Cerci, 2002). Aunque la planta trabaja a una eficiencia aceptable, siguen existiendo diversos componentes de la misma en los que se pueden llevar a cabo mejoras para incrementar sustancialmente su eficiencia. El módulo de membranas es el componente en donde más exergía se destruye y por lo tanto se deben de concentrar los esfuerzos para lograr que éste trabaje de mejor manera, ya sea mediante la implementación de membranas de mayor calidad o reduciendo la cantidad de incrustaciones y depósitos de sales. En ambos casos, es necesario evaluar la rentabilidad de dichas mejoras para determinar cuál pudiera ser la mejor alternativa.

Al tratarse de un proceso de filtración mediante membrana, para la OI no se requiere de ninguna fuente térmica para su funcionamiento y la exergía que recibe la planta ingresa en forma de energía eléctrica mediante las bombas de alta y baja presión, es por ello que el uso de bombas que trabajen a una alta eficiencia es indispensable para conseguir una disminución en la energía requerida para el proceso.

Al salir del módulo de membranas, el flujo de salmuera contiene una gran cantidad de energía, por lo cual el uso de equipos que permitan recuperar parte de esa energía es indispensable al momento de diseñar una planta, pues con la ayuda de este tipo de equipos es posible recuperar aproximadamente un 30% de la energía que alimenta a la planta.

Aunque el fijarse como propósito poder elevar las eficiencias de las tres plantas hasta un 30% o 40% pudiera parecer una meta muy difícil de conseguir, resulta ser un objetivo muy realista si se considera que en muchos de los procesos de ingeniería que operan en la actualidad se obtienen eficiencias de segunda ley inclusive superiores al 50%.

Como conclusión final, se puede afirmar que el análisis termodinámico resulta una excelente herramienta al momento de diseñar o supervisar el funcionamiento de cualquier proceso de ingeniería, con el cual se tiene la oportunidad de cuantificar la eficiencia del proceso y evidenciar las posibles mejoras que se le pueden aplicar. Como se mostró en los últimos capítulos de este trabajo, durante un análisis termodinámico, con la aplicación de la primera ley de la termodinámica es posible obtener los balances de masa y energía para cada una de las

plantas y con ayuda de la segunda ley de la termodinámica se obtienen los balances exergéticos que permiten determinar la eficiencia de los procesos y de los componentes que conforman la planta, para poder identificar aquellos en los que resulta más conveniente efectuar mejoras para conseguir un mayor incremento en la eficiencia general del proceso. Para que el análisis termodinámico pueda proporcionar los datos precisos que se requieren conocer del funcionamiento de la planta, se tienen que definir correctamente los subsistemas o conjunto de equipos que se van a analizar, de tal modo que la suma de todos ellos constituya el total de la planta, así como el conjunto de flujos de materia, trabajo y calor que los relaciona entre si y a su vez con el entorno del proceso. Solo con la correcta elección del grado óptimo de agregación de la planta se podrán conseguir los objetivos planteados previo a la elaboración del análisis.

Referencias

- Ahmad, M. (2002). *Environmental effects of multi-stage flash (MSF) desalination plant at Al - Jubail Saudi Arabia* (tesis de maestría). Memorial University of Newfoundland, Newfoundland, Canada.
- Armijo, F. (2012). *Cien años de análisis de las aguas mineromedicinales*. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Barreto, C. E. (2011). *Análisis químico I – Un enfoque ambiental*. Callao, Perú: Universidad Nacional del Callao.
- Cappetti, G. (2016). *100 años de Geotermia en Larderello, Desde la explotación intensiva a la producción sustentable*. Recuperado de https://ambcittadelmessico.esteri.it/ambasciata_cittadelmessico/resource/doc/2016/02/g._cappetti_-geo_mex.pdf
- Cerci, Y. (2002). Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California. *Desalination*, 142, 257-266.
- Cerci, Y. (2002). The minimum work requirement for distillation processes. *Exergy, an International Journal*, 2, 15-23.
- Cengel, Y. A., Cerci, Y. y Wood, B. (1999). Second Law Analysis of Separation Processes of Mixtures. *ASME-AES*, 39, 537-544.
- Cengel, Y. A. y Boles, M. (2011). *Termodinámica*. Ciudad de México: McGraw-Hill.
- Cifuentes, J. L., Torres, M. P. y Frías, M. (1997). *El océano y sus recursos. II. Las ciencias del mar: Oceanografía geológica y oceanografía química*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). *Documento regional de las Américas, 7th World Water Forum*. Recuperado de <http://www.oas.org/en/sedi/dsd/IWRM/Documentspot/WWF-7-Doc%20Americas.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Atlas del agua en México*. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/AAM_2016.pdf
- Comisión Nacional del Agua. (2016). *Estadísticas del agua en México*. Recuperado de https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/03/Estadisticas-del-Agua-en-Mexico_2016.pdf
- Duffie, J. y William, B. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. New Jersey, EUA: John Wiley & Sons, Inc.
- ECOAGUA. (2009). *Desalación mediante compresión de vapor*. Madrid, España: Ecoagua Ingenieros.
- ECOAGUA. (2009). *Desalación mediante evaporación instantánea multietapa*. Madrid, España: Ecoagua Ingenieros

- ECOAGUA. (2009). *Desalación mediante evaporación múltiple efecto en tubos horizontales*. Madrid, España: Ecoagua Ingenieros.
- ECOAGUA. (2009). *Desalación mediante ósmosis inversa*. Madrid, España: Ecoagua Ingenieros.
- El-Dessouky, H. T. y Ettouney, H. M. (2002). *Fundamentals os salt water desalination*. Ámsterdam, Países Bajos: ELSEVIER SCIENCE B.V.
- Estrada, C. A. (Ed.). (2010) *Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México*. Ciudad de México: Academia Mexicana de Ciencias.
- FAO. (2015). *Towards a water and food secure future, Critical perspectives for policy-makers*. Roma, Italia: FAO & WWC.
- FAO. (2016). *Agua y empleo*. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002441/244103s.pdf>
- Germán, D. I., González, R., y Ponce, N. E: (mayo 2012). Técnicas para desalinizar agua de mar y su desarrollo en México. *Ra Ximhai*, 8(2), 57-68.
- Hamed, O. A., A1-Sofi, M. A. K., Imam, M., Mustafa, G. M., Mardouf, K. B. y A1-Washmi, H. (2000). Thermal performance of multi-stage flash distillation plants in Saudi Arabia. *Desalination*, 128, 281-292.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGEUM_2017/702825097912.pdf
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007). *Biomasa: Gasificación*. Recuperado de http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Gasificacion_A2007_596f03d5.pdf
- International Desalination Association. (2018). *Desalination Yearbook 2017–2018*. Recuperado de <https://www.paperturn-view.com/uk/global-water-intelligence-paid/gwi-ida-yearbook-2017-2018-full-final2?pid=MTY16585&p=19&v=4>
- Kahraman, N. y Cengel, Y. A. (2005). Exergy analysis of a MSF distillation plant. *Energy Conversion and Management*, 46, 2625- 2636.
- Laborde, M. A. (Ed.). (2016). *Energía solar*. Buenos Aires, Argentina: Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
- Llopis, G. y Rodrigo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Madrid, España: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Lyman, J. y Fleming, R. (1940). Composition of seawater. *Journal of Marine Research*, 3, 134-146.
- McCabe, W. L., Smith, J. C. y Harriott, P. (1998). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- MinE. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía biomasa*. Recuperado de http://www.energía.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf

- MinE. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía eólica*. Recuperado de http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_eolica.pdf
- MinE. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía geotérmica*. Recuperado de http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_geotermica.pdf
- MinE. (2008). *Energías Renovables 2008 - Energía solar*. Recuperado de http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_solar.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1984). *La escala de salinidades prácticas de 1978 y la ecuación internacional de estado del agua del mar de 1980*. París, Francia: UNESCO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1987). *Tablas oceanográficas internacionales*. París, Francia: UNESCO.
- Peña, H. (2016). *Desafíos de la seguridad hídrica en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile: Naciones Unidas.
- Pérez, J. L. (2013). *Tecnología de electrodiálisis reversible*. Recuperado de <http://www.desalación.org/en/electrodialisis/teoria/>
- REN21. (2017). *Renewables 2017 global status report*. Recuperado de http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf
- Ros, A. (2011). *El agua, Desalación*. Recuperado de <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-1-4>
- Solverde. (2011). *Eficiencia de colectores solares*. Recuperado de <http://blog.solveverde.com.uy/2011/11/eficiencia-de-colectores-solares.html>
- Schallenberg, J. C. (Ed.). (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*. Canarias, España: Instituto Tecnológico de Canarias, S.A.
- UN-Water. (2014). *Sanitation for all*. Recuperado de <http://www.un.org/spanish/waterforlife/decade/sanitation.shtml>
- Werlinger, C. (Ed.). (2004). *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos*. Valparaíso, Chile: Consejo Nacional del Libro y la Lectura.
- Willaarts, B. A. (Ed.). (2014). *Seguridad hídrica y alimentaria en América Latina y el Caribe implicaciones regionales y globales*. Madrid, España: Fundación Botín.