

CENTRO DE INVESTIGACIONES  
EN ÓPTICA, A.C.

“DESALINIZACIÓN DE AGUA PARA  
APLICACIONES DE POTABILIZACIÓN  
MEDIANTE EL DESARROLLO DE  
TECNOLOGÍA SOLAR SUSTENTABLE”



Para obtener el grado de  
MAESTRO EN OPTOMECASTRÓNICA

ASESOR: Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano

ESTUDIANTE: Ing. Omar Guadalupe Claudio  
Gómez

*Octubre de 2018*  
*Aguascalientes, Ags, México*

*Jurado Asignado*

**PRESIDENTE:** *Dr. Carlos Antonio Pineda Arellano.*

**SECRETARIO:** *Dr. Fernando Martell Chávez*

**VOCAL:** *Dr. Ulises Dehesa Carrasco (IMTA)*

*Lugar dónde se realizó la Tesis:*  
***CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA***  
***A.C. (CIO)***  
***AGUASCALIENTES, AGS.***

## *A G R A D E C I M I E N T O S*

A mis padres José Guadalupe y María Aurora, por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi vida, tanto en lo económico como en lo moral, por sus consejos y por ser la mano que me guía por el buen camino, a ustedes les debo lo que ahora soy.

A mis hermanos por estar siempre disponibles para escuchar mis problemas y apoyarme a tomar las mejores decisiones, por apoyarme en mis sueños.

A Saira Zuleima, por acompañarme durante esta etapa, por todo el cariño y la paciencia brindada, por soportar las noches en las que solo estaba escribiendo cosas, por permitirme formar parte de su familia y por el apoyo para poder dar este importante paso en mi vida.

A mis amigos, compañeros y hermanos de maestría, por darme la oportunidad de compartir tantas aventuras que vivimos juntos, por apoyarme en todo lo que necesité en mi estadía, por todas las charlas profundas y por soportar mi peculiar forma de expresarme.

Al Dr. Ulises Dehesa Carrasco por haberme transmitido todo su conocimiento y apoyo respecto al tratamiento de aguas en el Instituto Mexicano De Tecnologías Del Agua (IMTA) y al M.C. Rogelio Villalobos Por apoyarme en la parte de instrumentación del prototipo.

Al Dr. Carlos Antonio Pineda A. por ser mi asesor de tesis, por ser mi guía, por todo el apoyo brindado para poder concretar este trabajo, por compartir su conocimiento de forma abierta, por su paciencia y por ser un gran amigo.

Al Dr. Fernando Martell y al M.C. Eduardo Licurgo, por todos sus consejos en el diseño y elaboración del sistema fotovoltaico, así como toda la parte eléctrica del mismo.

Al Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO) por la oportunidad de cursar un posgrado de calidad, por facilitar las herramientas necesarias para que este trabajo y por todas las atenciones que han tenido conmigo.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la asignación de la beca de maestría, así como el apoyo recibido a través del proyecto Desarrollo Científico para atender Problemas Nacionales 2015-01-1651: "Diseño y Construcción de Potabilizador Integral Solar de Agua para Comunidades Rurales".

## *DEDICATORIA*

A mis padres, hermanos y mi esposa, por todo su amor y apoyo.

## *RESUMEN*

La desalinización de agua impulsada por la energía solar representa una solución conveniente para el consumo de agua potable en áreas remotas. En el presente trabajo se desarrolló un prototipo funcional basado en ósmosis inversa, acoplado a un sistema fotovoltaico y un sistema de medición y caracterización de las variables de interés las cuales: son conductividad eléctrica, presión y radiación solar. Se estudió el sistema de desalinización basado en una membrana de Ósmosis Inversa Fotovoltaica (RO-PV, por siglas en inglés), el trabajo experimental exploró el efecto de la concentración de sales minerales del influente y la radiación solar sobre la producción de permeado, el consumo de energía, la tasa de recuperación y la calidad del producto permeado. Se realizaron estudios bajo diferentes condiciones de entrada de las concentraciones influentes. En cada conjunto, la concentración de influente se mantuvo constante, variando sólo la irradiancia a lo largo del día solar. Además, se estimó un costo unitario del agua permeada producida. Debido a la latitud del lugar ( $21^{\circ}52'56''$  N), época del año y efectos de humedad atmosférica la máxima radiación registrada fue de  $735.2 \text{ W/m}^2$  y con una presión de 77.2 PSI obteniendo así 24.5 l/min. Para comprobar que el permeado se encuentra en las condiciones adecuadas para su consumo y que cumpla la Norma Mexicana NOM-SSA1-127-1994, que es la que regula el uso y consumo de agua potable para consumo humano, se enviaron los resultados al laboratorio del Instituto Mexicano De Tecnologías del Agua (IMTA). El sistema prototipo RO-PV desarrollado logra producir de 0.5 a  $1 \text{ m}^3/\text{día}$ , lo cual indica un buen desempeño con un costo unitario de agua permeada de 1.075-2.15 US\$/ $\text{m}^3$  considerando los costos de construcción y de operación del sistema, lo cual representa un costo competitivo para este tipo de sistemas.

# ÍNDICE GENERAL

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Antecedentes	5
1.3 Planteamiento del Problema	8
1.4 Justificación	9
1.5 Objetivos	9
Capítulo 2: Marco Teórico	10
2.1 Características Físicoquímicas del Agua Con Alto Contenido De Sales	10
2.2 Parámetros Físicoquímicas Directos e Indirectos de la Salinidad	11
2.2.1 Conductividad Eléctrica (CE)	12
2.2.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT)	12
2.2.3 Dureza Total (DT)	13
2.2.4 Alcalinidad Total (AT)	14
2.2.5 Temperatura	15
2.2.6 pH	15
2.2.7 Sodio	16
2.2.8 Sulfatos	16
2.2.9 Nitratos	16
2.3 Desalinización	17
2.4 Desalinización de Agua usando Energía Solar	18
2.4.1 Destilación Solar	19
2.4.2 Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)	20
2.4.3 Destilación Multiefecto (MED)	21
2.4.4 Compresión de Vapor (VC)	22
2.4.5 Electrodialisis (ED)	23
2.4.6 Destilación por Membrana (MD)	25
2.5 Ósmosis Inversa (RO)	26
2.5.1 Mecanismo de Transporte en Membranas	26
2.5.2 Principio de Operación	27
2.5.3 Membranas	28
2.5.4 Configuración y Módulos de Membranas	28
2.5.5 Ensuciamiento de membranas y técnicas de limpieza	30
Capítulo 3: Metodología y Materiales	32
3.1 Software ROSA (Reverse Ósmosis System Analysis)	32
3.1.1 Variables de Interés en ROSA	32
3.1.2 Parámetros de Calidad en ROSA	33

3.1.3 Selección de las Membranas _____	35
3.2 Selección de la bomba _____	37
3.3 Diseño del Sistema Desalinizador _____	37
3.4 Construcción del Sistema Desalinizador _____	39
3.5 Metodología aplicada a nivel laboratorio _____	39
3.5.1 Descripción del modelo físico _____	39
3.5.2 Preparación del Influyente _____	40
3.5.3 Instrumentación del Sistema Desalinizador _____	41
3.5.4 Desarrollo experimental _____	43
3.5.5 Eficiencia de la Recuperación de Permeado (RR) _____	44
3.5.6 Eficiencia de la Recuperación de Permeado (RR) _____	44
3.5 Metodología aplicada en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO) _____	45
3.6.1 Descripción del modelo físico _____	45
3.6.2 Desarrollo Experimental _____	46
3.6.3 Dimensionamiento Fotovoltaico _____	47
3.6.4 Diseño de Base para Paneles Fotovoltaicos _____	50
3.6.5 Construcción de Base para Paneles _____	50
3.7 Evaluación Económica _____	51
Capítulo 4: Resultados _____	52
4.1 Prototipo puesto en Operación _____	52
4.2 Resultados Obtenidos a nivel laboratorio _____	53
4.2.1 Calidad del Agua _____	53
4.2.2 Efectos de la Radiación solar _____	54
4.2.3 Evaluación del Sistema RO-PV _____	55
4.3 Resultados Obtenidos en el Centro de Investigaciones En Óptica A.C. (CIO) _____	56
4.3.1 Calidad del Agua _____	56
4.4 Comparación con la Norma Oficial Mexicana NOM-SSA1-127-1994 _____	57
4.5 Evaluación Económica _____	59
Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones _____	62
5.1 Conclusiones _____	62
5.2 Recomendaciones _____	63
Trabajo Futuro _____	64
Referencias _____	65
Anexos _____	i
Anexo A _____	i
Anexo B _____	vi
Anexo C _____	viii

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) [5].	2
Figura 2. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m <sup>2</sup> al día [7].	4
Figura 3. Clasificación general de las tecnologías empleadas en la desalinización [8].	5
Figura 4. Mapa que muestra la distribución geográfica a nivel mundial de plantas PV-RO sobre agua salobre y agua de mar	8
Figura 5. a) Variación de las especies iónicas en función del pH y b) fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad [37].	14
Figura 6. Escala del pH de 0 a 14 [44]	16
Figura 7. Procesos de Desalación: Ósmosis Inversa (RO), Electrodiálisis (ED), Flashing en Múltiple Etapa (MSF), Destilación en Múltiple Efecto (MED), Compresión de Vapor (CV) [39]	17
Figura 8. Posibles configuraciones de recursos de energía solar con tecnologías de desalinización de agua [43]	19
Figura 9 Diagrama representativo de un destilador solar simple [46]	20
Figura 10. Planta de desalinización de evaporación multietapa impulsada por energía solar [47]	21
Figura 11. Diagrama esquemático de un sistema MED [49]	22
Figura 12. Diagrama esquemático de un sistema MED-VC	23
Figura 13. Diagrama del funcionamiento de un sistema de electrodiálisis [53]	24
Figura 14. Diagrama del funcionamiento de un sistema de electrodiálisis impulsada por energía fotovoltaica [52]	25
Figura 15. Módulo de Destilación por membrana solar [54]	25
Figura 16. Tamaño de poro de membranas de separación [55]	26
Figura 17. a) Osmosis, b) Equilibrio Osmótico y c) Osmosis Inversa [55]	27
Figura 18. Representación esquemática de un proceso de separación por membrana [57]	28
Figura 19. Módulo de Placas [61]	29
Figura 20. Modulo Tubular [61]	29
Figura 21. Módulo de espiral [61]	30
Figura 22. Simulación con las membranas seleccionadas	36
Figura 23. Dimensiones de la Membrana	36
Figura 24. Perfil de Estructura	38
Figura 25. Diseño final del Sistema Desalinizador	38
Figura 26. Sistema Desalinizador Construido	39
Figura 27. Modelo de desalinización evaluado a nivel laboratorio	40
Figura 28. Etiquetado de las muestras	40
Figura 29 Termopar constatan tipo T	41
Figura 30. Fotografía del Sistema de Adquisición de datos	41
Figura 31. Fotografía del Pirómetro Utilizado	42
Figura 32. Conductímetro marca HACH	42
Figura 33. Sensor de corriente Modelo ACS712-30 <sup>a</sup>	43
Figura 34. Modelo de Sistema Desalinización usado en CIO-Ags	45
Figura 35. Distribución de Energía Eléctrica en el Sistema Desalinizador	46
Figura 36. Diseño de Base para Paneles Fotovoltaicos	50
Figura 37. Construcción de Base para Paneles Fotovoltaicos	51
Figura 38. Comportamiento de la radiación respecto a la corriente que demanda el sistema.	54
Figura 39. Potencia de salida por el sistema fotovoltaico	55
Figura 40. Ecuación de calibración de los medidores de presión	55
Figura 41. Dependencia en la producción de permeado respecto a la presión de alimentación.	56

Figura 42. Ventana inicial de ROSA: Pestaña de “Información De Proyecto”	i
Figura 43. Alimentación de Datos agregando TDS totales de la muestra	i
Figura 44. Alimentación detallada de aniones y cationes presentes	ii
Figura 45. Nomenclatura de Membranas en ROSA	ii
Figura 46. Selección de la membrana	iv
Figura 47. Selección de No. de Tubos y Membranas por tubo	iv
Figura 48. Diagrama de Resultados en simulación de ROSA	v
Figura 49. Resultados Finales en ROSA	v

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad natural media del agua per cápita, por región Hidrológico-Administrativa (RHA), 2010 y 2030 [5]	2
Tabla 2. Puntos principales del desarrollo de plantas de osmosis inversa por Energía Fotovoltaica	6
Tabla 3. Plantas desalinizadoras de aguas salobres por medio de ósmosis inversa impulsada por energía fotovoltaica en el Mundo	8
Tabla 4. Principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido de sales.	11
Tabla 5 Clasificación del agua de acuerdo a la CE y a los TDS [33].	12
Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza [34].	13
Tabla 7 Clasificación del agua de acuerdo a su alcalinidad [35].	15
Tabla 8. Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos entre tecnologías térmicas y de membranas [41].	18
Tabla 9. Estudio de Calidad de Agua para Selección de Membranas	35
Tabla 10. Aparatos Eléctricos a utilizar en el Sistema Desalinizador	47
Tabla 11. Numero de Paneles Fotovoltaicos a utilizar en el Sistema Desalinizador	48
Tabla 12 Resumen de Componentes del Sistema Desalinizador Solar	52
Tabla 13. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua (SDT =615 mg/L)	53
Tabla 14. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua (SDT=1098 mg/L)	53
Tabla 15. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua en unidad CIO-Ags	57
Tabla 16. Comparación de Influyente, Efluente y límites Máximos Permisibles obtenidos en el IMTA	58
Tabla 17. Comparación de Influyente, Efluente y límites Máximos Permisibles de SDT obtenidos en CIO-Ags	58
Tabla 18. Comparación de Agua embotellada comercial y agua obtenida del desalinizador	58
Tabla 19. Componentes del Sistema RO-PV	59
Tabla 20. Características principales para la estimación de costos	60
Tabla 21. Costo Unitario de Agua Permeado Sin Amortización	60
Tabla 22. Estimación De Costo Unitario de Agua Permeada Con Amortización	61
Tabla 23. Costos de Diferentes Sistemas PV-RO	61
Tabla 24. Clasificación de membranas en ROSA	iii

## *Capítulo 1: Introducción*

En este capítulo se presenta un panorama general sobre la escasez de agua potable que existe en México y los efectos del incremento de la población sobre la presión a los mantos acuíferos a corto plazo. Se realiza una descripción general sobre la problemática actual de la contaminación de acuíferos por alta salinidad y dureza en la parte central y de las costas del país, una descripción amplia del recurso solar disponible en México, por otra parte se describe el estado de arte de la desalinización por ósmosis inversa con energía solar. Para finalizar, se presentan los objetivos y su justificación de esta tesis.

### *1.1 Generalidades*

Actualmente existe un problema mundial, cada vez peor, la escases de agua potable. Este fenómeno se ve acentuado en las zonas áridas donde este fenómeno es aún más acentuado. Un aspecto importante a considerar a futuro es el incremento de la población y su concentración en zonas urbanas. El incremento de la población ocasionará la disminución del agua renovable per cápita a nivel nacional, decreciendo de 3,736 m<sup>3</sup>/hab/año en 2014 a 3,253 m<sup>3</sup>/hab/año para el 2030 [1]. Entre 2014 y 2030 la población del país se incrementará en 17.8 millones de personas y se estima que para el 2030 aproximadamente el 78.3% de la población total se asentará en localidades urbanas [2], provocando con ello, escasez y aumento de la demanda de este recurso hídrico.

La principal fuente de abastecimiento de agua potable en el país procede de agua subterránea siendo un 38.7 % del volumen total concesionado para usos consuntivos [3]. En los últimos años esta fuente de agua potable ha sido afectada por dos tipos de contaminación: natural o antropogénico. En las causas naturales se encuentra la contaminación de mantos acuíferos por alta salinidad, debido a las propiedades del subsuelo.

Los acuíferos que presentan contaminación por aguas subterráneas salobres, se ubican principalmente en el centro y norte del país. Estos acuíferos forman parte de la región hidrológica-administrativa (RHA) número VIII (cuencas centrales del norte). Esta región se caracteriza por la presencia de aguas congénitas

y minerales de fácil disolución, así como condiciones de poca precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y de evaporación de aguas superficiales.

El país se divide en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA) (Figura 1), las cuales están formadas por agrupaciones de cuencas, que se consideran como unidades básicas de gestión de los recursos hídricos. México recibe cada año aproximadamente 1,489 miles de millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta cantidad el 73.1% se evapora regresando a la atmosfera, el 22.1% escurre en ríos y arroyos, y el 4.8 restante se infiltra al subsuelo de forma natural recargando mantos acuíferos.

México cuenta con 462 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable anualmente. De las 13 regiones Hidrológico-Administrativas, 11 disminuirán la disponibilidad media per cápita, 4 regiones de estas en 2030 niveles cercanos a los 1,000 m<sup>3</sup>/hab/año y 3 regiones llegarán a niveles inferiores, lo que de acuerdo al índice Falkenmark [4] se considera como una condición de escasez grave (Tabla 1).



Figura 1. Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) [5].

Tabla 1. Disponibilidad natural media del agua per cápita, por región Hidrológico-Administrativa (RHA), 2010 y 2030 [5]

No.	Región Hidrológico-Administrativa (RHA)	Agua renovable o Disponibilidad natural media (millones de m <sup>3</sup> /año)	Disponibilidad media per cápita 2010 (m <sup>3</sup> /hab/año)	Disponibilidad media per cápita 2030 (m <sup>3</sup> /hab/año)
I	Península de Baja California	5,021	1,250	840
II	Noroeste	8,231	3,161	2,828

<b>III</b>	Pacífico Norte	25,917	6,173	6,830
<b>IV</b>	Balsas	21,991	1,987	1,976
<b>V</b>	Pacífico Sur	32,683	6,814	8,127
<b>VI</b>	Río Bravo	13,022	1,144	983
<b>VII</b>	Cuencas Centrales del Norte	8,163	1,911	1,787
<b>VIII</b>	Lerma-Santiago-Pacífico	34,348	1,527	1,461
<b>IX</b>	Golfo Norte	26,604	5,301	5,177
<b>X</b>	Golfo Centro	94,089	9,349	9,480
<b>XI</b>	Frontera Sur	159,404	22,392	21,261
<b>XII</b>	Península de Yucatán	29,596	7,138	5,096
<b>XIII</b>	Aguas del Valle de México	3,515	160	148

Por otra parte, de acuerdo con la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE), en general, México cuenta con un nivel de medio a alto de radiación solar, existiendo regiones en las que destaca donde actualmente se aprovechan con éxito el recurso solar [6]. Estas zonas son las siguientes:

**Región Noroeste:** En la región noroeste se encuentra un área que tiene un alto nivel de radiación, la cual es la más alta de México. Abarca los Estados de Sonora, Chihuahua y la Península de Baja California, donde se recibe la mayor irradiación global durante todo el año.

**Región Noreste:** Esta región está conformada por los Estados de Durango, Tamaulipas, Nuevo León, Zacatecas y Aguascalientes, los cuales reciben altos flujos de irradiación de febrero a mayo. En esta zona sería propicia la instalación de sistemas de conversión de energía solar del tipo de concentración.

**Región Centro-Sur:** Puebla, Guerrero y Oaxaca, pertenecen a la región del centro – sur del país. En esta zona podemos encontrar un nivel de radiación que va desde el nivel medio hasta poder encontrarse, en ciertas zonas, con un nivel alto de radiación.

El territorio nacional destaca en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m<sup>2</sup> por día en el norte del país (Figura 2) [7]. México

es considerado a nivel mundial como uno de los países con mayor potencial de recurso solar.

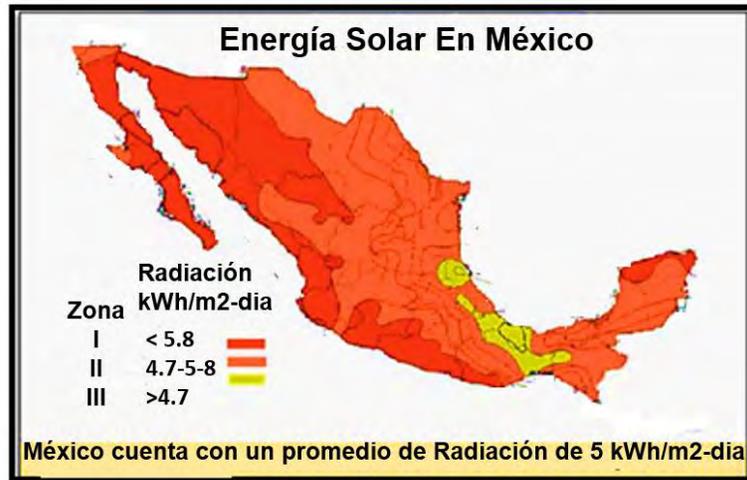


Figura 2. Mapa de Irradiación Solar, México, kWh/m<sup>2</sup> al día [7].

La desalinización es un proceso que permite obtener agua potable a partir de agua con alta salinidad. Para llevar a cabo este proceso existen diversas tecnologías las cuales varían en costos, impacto ambiental, calidad del producto, energía consumida, entre otras más. Sin embargo, todas tienen el mismo objetivo: reducir la concentración de sales disueltas del agua salobre o marina, al grado de producir agua destilada o desionizada.

Las tecnologías actuales para la desalinización se pueden clasificar en procesos principales y procesos alternativos. Dentro de los procesos principales, se encuentran los procesos térmicos y de membranas. En la Figura 3 se muestra una clasificación general de las tecnologías actuales empleadas en la desalinización [8].

Se ha demostrado que la desalinización es una tecnología prometedora y viable para proporcionar agua potable [9]. Pero el principal problema que impide el uso masivo de tecnologías de desalinización es el alto costo económico asociado, especialmente debido al consumo intensivo de energía [10]. Además, el uso de combustibles fósiles como fuente de energía resta atractivo a su implementación por las preocupaciones sobre el cambio climático y la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y el suministro de energía más limpia [11].

Debido a la escasez de agua dulce, la oportunidad para el uso de energía renovable para alimentar pequeños sistemas de desalinización de agua marina y salobre se ha hecho posible en muchas pequeñas ciudades y zonas rurales de escasos recursos [12]. Actualmente, la desalinización por ósmosis inversa asistida con fuentes de energía renovable ha sido ampliamente estudiada en la literatura [13-18].

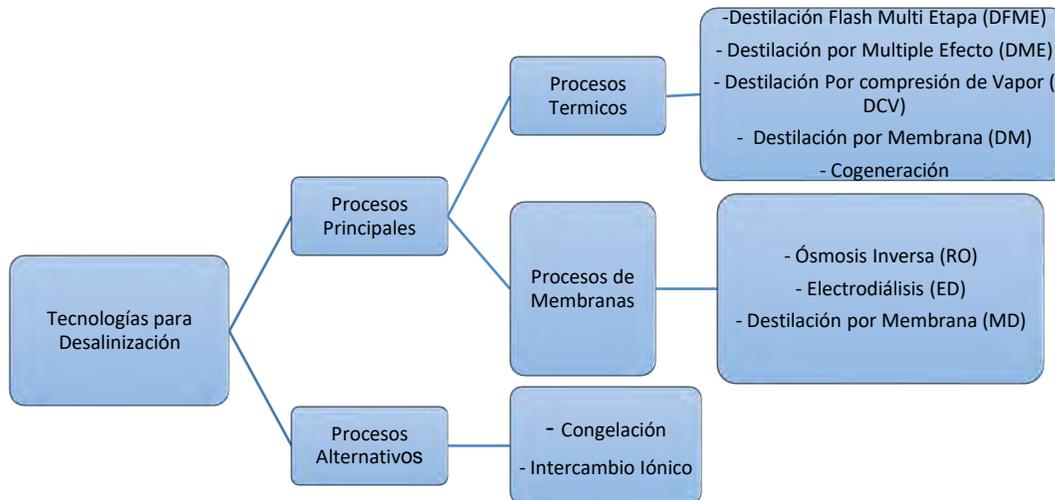


Figura 3. Clasificación general de las tecnologías empleadas en la desalinización [8].

Entre las aplicaciones de desalinización de energía renovable impulsadas por RO, se ha demostrado que la planta autónoma PV-RO es factible tanto en términos de técnicas como de costos en escala de laboratorio y sistemas de escala piloto [19-22]. En la actualidad, se considera una solución adecuada para aplicaciones de desalinización en pequeña escala en áreas rurales con alto aislamiento solar [23].

## 1.2 Antecedentes

Los primeros reportes sobre la tecnología de desalinización PV-RO datan de principios de los años ochenta (Tabla 2). Sin embargo, recientemente se reactivaron esfuerzos para evaluar su viabilidad técnica y económica. Es importante señalar que la mayoría de las investigaciones experimentales se llevaron a cabo anteriormente en países (principalmente en la parte más meridional de Europa), donde la irradiancia solar media anual en una superficie horizontal fue considerablemente más alta que la media mundial, y existía severa escasez física de agua. Los sistemas PV-RO se han empleado tanto para agua salobre como para agua marina y actualmente existen plantas con una capacidad de 100 a 1000 LPH (litros por hora) (Figura. 4).

Thomson e Infield [24-27] propusieron una planta de PV-RO que fue capaz de operar sin baterías. Ellos realizaron experimentos de laboratorio para validar el modelo y el control del sistema con una capacidad de 3 m<sup>3</sup>/día con un conjunto Fotovoltaico de 2.4 kWh. Se simuló e implementó una unidad de RO a pequeña escala que opera mediante un sistema fotovoltaico, para sitios rurales remotos con una producción diaria típica de 100-500 l que funciona con presiones tan bajas como

5 bar [28]. Se presentó el diseño de un sistema híbrido de energía eólica independiente para alimentar un agua de mar, con recuperación de energía utilizando un sistema simplificado con un modelo de hoja de cálculo. El ahorro de energía realizado fue cercano al 50% cuando una unidad de recuperación de energía del tipo de intercambiador de presión fue considerado [29, 30].

*Tabla 2. Puntos principales del desarrollo de plantas de ósmosis inversa por Energía Fotovoltaica*

<b>Año</b>	<b>Plantas PV-RO</b>
<b>1982</b>	La primera planta de ósmosis inversa de agua marina con energía solar fotovoltaica del mundo [31]
<b>1985</b>	Introducción de un dispositivo de recuperación de energía (bomba de recuperación de energía de desplazamiento positivo) en una planta de ósmosis inversa de agua de mar con alimentación fotovoltaica [32]
<b>1988</b>	Primera planta de ósmosis inversa de agua salobre impulsada por PV [65]
<b>1998</b>	Planta híbrida de agua salobre impulsada por PV de ósmosis inversa [66]
<b>2001</b>	Primer sistema salobre de ósmosis inversa con alimentación fotovoltaica sin batería [24]
<b>2002</b>	Primer sistema de ósmosis inversa de agua de mar alimentado con energía fotovoltaica sin batería [28]

De acuerdo con la Tabla 3, se observa que hasta ahora, los sistemas PV-RO para agua salobre que se han estudiado hasta 11.46 kW y 60 kW de potencia en corriente alterna (ca), respectivamente. Esto se debe al hecho de que los sistemas PV-RO para fuente de agua salobre han sido operados a una presión más baja (15 bar) en comparación con aquellos con una fuente de agua de mar (65 bar). Como resultado, los sistemas PV-RO de agua salobre tienen menor consumo específico de energía (SEC) ( $3.03 \text{ kWh/m}^3$ ) en comparación con el agua de mar ( $7.73 \text{ kWh/m}^3$ ). La tasa máxima de flujo de permeado de los sistemas de desalinización PV-RO de agua salobre y agua de mar es de hasta 2,170 l/h y 4,166 l/h, respectivamente.

Estas comparaciones concluyen que las plantas de desalinización de PV-RO solares pueden satisfacer un máximo de 4,000 l/h de demanda de agua potable de manera económica. El rendimiento de agua dulce de más de 4,000 l/h requiere mayores costos de capital y mano de obra, y por lo tanto, hace que los sistemas de desalinización no solar sean más económicos [67].

Recientemente, se presentaron los resultados de las simulaciones que se usaron para investigar un sistema autónomo de energía solar (PV) de pequeña escala, autónomo, con y sin almacenamiento de batería [68]. Los resultados mostraron que el rendimiento del sistema se ve afectado de manera diferente al

incluir las características de potencia de los dispositivos de RO y la resolución temporal utilizada en las simulaciones.

Se desarrolló un prototipo de desalinización portátil (1 m<sup>3</sup>/día) basado en un proceso de RO alimentado por paneles fotovoltaicos solares sin utilizar una batería de almacenamiento intermedio [69]. Se investigaron los efectos de la fluctuación de la energía y el pH en la retención de contaminantes disueltos del agua subterránea australiana real usando un sistema de nanofiltración/ósmosis inversa (UF-NF/RO) de ultrafiltración con energía solar fotovoltaica [70,72]. Descubrieron que el sistema de membranas de energía renovable eliminaba de forma fiable sales y contaminantes inorgánicos en un rango de energía real y condiciones de pH a través de mecanismos de convección / difusión y precipitación.

PAÍS	AÑO	TDS (mg/l)	Flujo de permeado (l/h)	Presión (bar)	Transmisión de la bomba (AC/DC)	Potencia PV (kW)	Almacén de Baterías	SEC (kWh/m <sup>3</sup> )
Oman [73]	1998	1010	1000	---	AC	11.46	SI	----
Oman [74]	2000	1010	1000	---	AC	3.25	SI	----
Fortaleza, Brasil [75]	2004	1200	250	8.27	AC	1.1	SI	3.03
Kassel, Alemania[76]	2002	2000	143	---	AC	1.07	SI	----
Jordan [77]	2008	3000	250-300	----	AC	---	SI	----
Palestina[78]	2003	3382	2170	----	AC	8.9	SI	2
Egipto [79]	2012	3400	208	---	AC	1.8	SI	9
Sídney, Australia [80]	2003	3500	100	6-7	AC	0.255	NO	2
Jakarta, Indonesia[65]	1988	3500	500	40	AC	24.5	SI	4-6
Australia [71]	2008	5300	46	9	AC	----	NO	2.3
Central Australia [81]	2007	5300	250	12	AC	0.6	SI	1.2
Sadous [66], Riyadh, Arabia Saudita	1998	5800	600	---	AC	10.08	SI	--
Túnez [82]	2011	6000	25	15.5	AC	30.8	NO	---
España [83]	2010	6000	107-252	8-13.5	AC	0.36	SI	1.3
Amman [67], Jordán	2005	400	11	---	DC	0.07	NO	---
Brasil [84]	2009	800	50	---	DC	0.165	NO	1.57
Australia [72]	2009	1000	150-280	4	DC	---	NO	1.1
Australia [85]	2005	1500-5000	42	4-15	DC	---	NO	3
Jordán [86]	2012	1700	21	4.5	DC	0.432	SI	13.82
Túnez [87]	2005	2800	2	2-5	DC	---	NO	---
Australia [88]	2009	3000	17	2	DC	0.12	NO	---

Colorado, EUA [89]	2004	3500	500	17.25	DC	0.44	NO	1.38
Australia [90]	2005	5000	42	10	DC	---	NO	2.2
Lisboa, Portugal	2001	5000	4-20	5	DC	0.05-0.15	NO	---
Australia [91]	2011	---	---	12	DC	---	NO	1.9

Tabla 3. Plantas desalinizadoras de aguas salobres por medio de ósmosis inversa impulsada por energía fotovoltaica en el Mundo

Existen también en varios países del mundo plantas de PV-RO exclusivas para tratar agua salada por ejemplo en el continente europeo se encuentran las plantas de Reino Unido que tratan concentraciones de influente [24,25] que oscilan entre 32,000 y 40,000 mg/l. Grecia posee de igual manera 2 plantas PV-RO de agua salada las cuales tratan 40,000 y 25,000 mg/l respectivamente [29,30]. En el continente asiático se encuentra la planta PV-RO que trata agua salada con mayor concentración con un valor de 45,000 mg/L ubicada en los Emiratos Árabes Unidos [68].

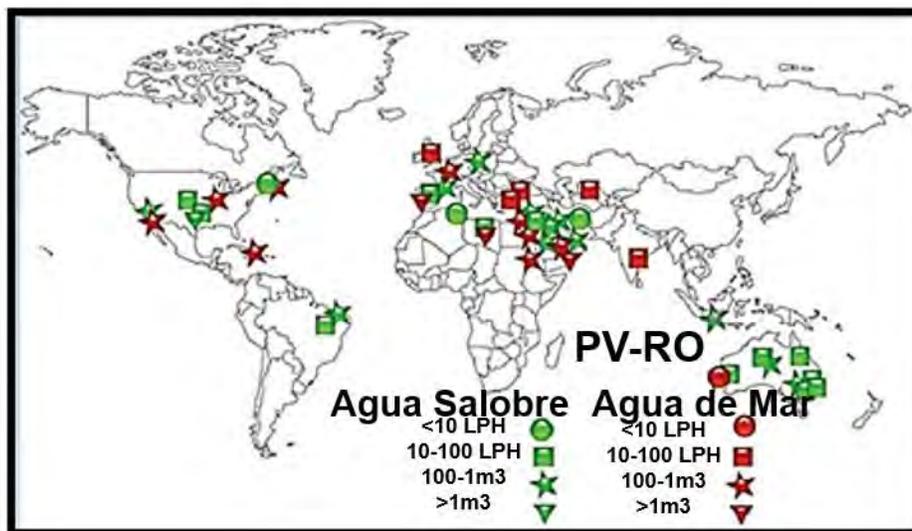


Figura 4. Mapa que muestra la distribución geográfica a nivel mundial de plantas PV-RO sobre agua salobre y agua de mar

### 1.3 Planteamiento del Problema

En el territorio nacional hay distribución de agua potable del 91.6% en zonas urbanas, 5% a zonas rurales y el resto se puede encontrar en los depósitos naturales. Dicho porcentaje no es suficiente para cubrir necesidades básicas o bien para consumo humano y aumentar la calidad de vida. Sin embargo, las zonas rurales cuentan con reservas de agua que no se encuentran en óptimas

condiciones, las cuales ofrecen una alternativa para cubrir con dicha necesidad. Considerando que no se cuentan con servicios básicos por ser zonas de difícil acceso, se piensa en la posibilidad de hacer uso de recursos naturales como agua de pozos, presas o estanques y energía solar, como solución al problema de abastecimiento de agua potable.

## *1.4 Justificación*

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

## *1.5 Objetivos*

1. Diseñar y construir una planta prototipo de desalinización basada en el uso de membranas de osmosis inversa, equipada con paneles fotovoltaicos e instrumentados para trabajar de forma autónoma.
2. Llevar a cabo la optimización del prototipo para desalinizar agua salobre hasta valores aceptables por la normatividad mexicana, y en volúmenes entre 200 y 500 l/día.
3. Evaluar el desempeño del prototipo construido en condiciones reales de operación en la plataforma solar del CIO-Aguascalientes.
4. Llevar a cabo el análisis costo/beneficio del prototipo construido y de su viabilidad técnico-económica.
5. Es deseable publicar los resultados obtenidos en el proyecto en una revista científica de circulación internacional y/o mediante la presentación en foros adecuados como congresos nacionales e internacionales.

## *Capítulo 2: Marco Teórico*

En este capítulo se describen las características fisicoquímicas de calidad del agua con alto contenido de sales, así como los parámetros fisicoquímicos directos e indirectos. Se aborda el tema de la desalinización con energía fotovoltaica a nivel mundial como una solución a la demanda de agua potable y como una alternativa de tratamiento de acuíferos contaminados por alta salinidad. Se realiza una clasificación general de las tecnologías empleadas para llevar a cabo el proceso de la desalinización. Dentro de estas tecnologías se encuentra la Osmosis Inversa (RO) que se explicará detalladamente. Por último se da una breve descripción del Software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis por sus siglas en inglés) para la simulación en del Proceso de Osmosis Inversa.

### *2.1 Características Fisicoquímicas del Agua Con Alto Contenido De Sales*

El agua con alto contenido de sales se caracteriza por la presencia de sales minerales denominadas iones. Por su presencia, estos iones se pueden clasificar en iones mayores o menores; por su carga, en aniones (-) y cationes (+); y por su estado de oxidación o valencia, en monovalentes (una valencia) y divalentes (dos valencias). Estos iones disueltos en el agua pueden provocar un incremento en el valor de la conductividad eléctrica (CE), así como un aumento en la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), de la dureza y de la alcalinidad total. Estos cuatro parámetros fisicoquímicos están relacionados directamente con la temperatura y el pH del agua.

Una variación en la temperatura afecta el movimiento iónico, lo que provoca un incremento de la CE de aproximadamente 12% por cada grado Celsius (°C). Por otra parte, el pH puede alterar la concentración de las especies de carbono inorgánico, provocando cambios en la concentración de la dureza y la alcalinidad. Si cualquiera de estos dos factores cambia, también cambiarían las propiedades del agua, modificando la solubilidad de los iones presentes.

En la Tabla 4 se muestran los principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido en sales.

Tabla 4. Principales iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua con alto contenido de sales.

IONES MAYORITARIOS		IONES MINORITARIOS	
CATIONES	ANIONES	CATIONES	ANIONES
Sodio ( $Na^+$ )	Cloruro ( $Cl^-$ )	Estroncio ( $Sr^{2+}$ )	Bromuro ( $Br^-$ )
Potasio ( $K^+$ )	Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )	Amonio ( $NH_4^+$ )	Fluoruro ( $F^-$ )
Calcio ( $Ca^{2+}$ )	Carbonato ( $CO_3^{2-}$ )	Bario ( $Ba^{2+}$ )	Nitrato ( $NO_3^-$ ) y Nitritos ( $NO_2^-$ )
Magnesio ( $Mg^{2+}$ )	Bicarbonato ( $HCO_3^-$ )	Boro ( $B^+$ )	Silicatos ( $SiO_3^{2-}$ )
	Hidróxidos ( $OH^-$ )		Fosfatos ( $PO_4^-$ )

La salinidad del agua está en función del tipo y de la cantidad de sales que contenga. Por su salinidad, el agua con alto contenido de sales se puede clasificar en agua potable, salobre, marina o salmueras. Por una parte, la salinidad del agua salobre estará en función de la geología del subsuelo (carbonatos, sulfatos, silicatos, etc.), mientras que la salinidad del agua marina está dada, en su mayoría, por cloruro de sodio ( $NaCl$ ) disociado en el catión sodio ( $Na^+$ ) y el anión cloruro ( $Cl^-$ ).

## 2.2 Parámetros Fisicoquímicas Directos e Indirectos de la Salinidad

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

Los parámetros fisicoquímicos directos además de cuantificar la concentración total pueden predecir las especies iónicas presentes en la solución. Entre los parámetros fisicoquímicos directos se encuentra la dureza total, que se debe principalmente a la presencia de los cationes divalentes de calcio ( $Ca^{2+}$ ) y magnesio ( $Mg^{2+}$ ). La alcalinidad total, que se debe principalmente a los carbonatos,

bicarbonatos e hidróxidos. Los sulfatos y los cloruros, que se deben a la presencia del anión sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y del catión cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), respectivamente.

### 2.2.1 Conductividad Eléctrica (CE)

Es un parámetro operativo importante para evaluar la eficacia de la remineralización del agua desalinizada. Los valores normales (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) para el agua desalinizada son muy bajos, mientras que el agua tratada de manera satisfactoria debe tener unos valores más altos.

Una contaminación del destilado o filtrado de agua del mar se puede detectar fácilmente debido a la alta conductividad del agua de mar (por ejemplo: 50,000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

La ecuación 1 expresa la Ley de Ohm simplificada, la cual es necesaria para determinar teóricamente la CE.

$$V = R * I \quad (1)$$

Donde:

$V$ = Voltaje o Diferencia de Potencial [=] (V)

$R$ = Resistencia Eléctrica [=] ( $\Omega$ )

$I$ = Corriente Eléctrica [=] (A)

La tabla 5 muestra la clasificación del agua según la cantidad de CE y de TDS:

Tabla 5 Clasificación del agua de acuerdo a la CE y a los TDS [33].

Clasificación	SDT (mg/l)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
Agua Potable	50-1,000	100-2,000
Agua Salobre	1,000-10,000	2.000-5,000
Agua Marina	10,000-100,000	5.000-45,000
Salmuera	>100,000	45,000-100,000

### 2.2.2 Sólidos Disueltos Totales (SDT)

Los SDT son sustancias orgánicas e inorgánicas solubles en agua, las cuales no pueden ser retenidas en el material filtrante. Los SDT son la diferencia entre los sólidos totales (TS) menos los sólidos suspendidos totales (TSS) y son reportados usualmente en mg/l. En la ecuación 2 se explica la manera de obtener los SDT.

$$SDT = TS - TSS \quad (2)$$

Donde:

$SDT = \text{Sólidos Disueltos Totales [=]} \text{ (mg/l)}$

$ST = \text{Sólidos Totales en [=]} \text{ (mg/l)}$

$SST = \text{Sólidos Suspendidos Totales [=]} \text{ (mg/l)}$

### 2.2.3 Dureza Total (DT)

La dureza total (DT) es definida como la concentración de todos los cationes divalentes metálicos no alcalinos presentes en forma de carbonatos o bicarbonatos en una solución. A la DT se le atribuye la formación de incrustaciones en recipientes, equipos y tuberías domésticas e industriales, así como la precipitación de jabones y detergentes en contacto con el agua, alterando con ello la formación de espuma. La dureza, medida en concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), debe estar entre 100 mg/l y 200 mg/l para evitar la corrosión y la incrustación, respectivamente.

El método para la determinación de la DT se basa en la formación de complejos estables al reaccionar la sal disódica del ácido etilen-diamino-tetraacético (EDTA) principalmente con los cationes divalentes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  [36]. En la ecuación 3 muestra la forma de generar la DT.

$$DT = D\text{Ca}^{2+} + D\text{Mg}^{2+} \quad (3)$$

Donde:

$DT = \text{Dureza Total [=]} \text{ (mg de CaCO}_3\text{/l)}$

$D\text{Ca}^{2+} = \text{Dureza de Calcio [=]} \text{ (mg de CaCO}_3\text{/l)}$

$D\text{Mg}^{2+} = \text{Dureza de Magnesio [=]} \text{ (mg de CaCO}_3\text{/l)}$

Una vez realizado el cálculo, el agua puede ser considerada dentro de una clasificación dependiendo del valor obtenido de dureza, como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6. Clasificación del agua de acuerdo a su dureza [34].

Clasificación	Dureza Total (mg/l de $\text{CaCO}_3$ )
Blandas	0-75
Moderadamente Dura	75-150
Dura	150-300
Muy Dura	>300

## 2.2.4 Alcalinidad Total (AT)

La alcalinidad total (AT) es la capacidad de una solución para neutralizar ácidos o aceptar protones, representa la sumatoria de las bases tituladas y es inversamente proporcional a la acidez total. La AT puede ser determinada empleado dos indicadores: fenolftaleína y anaranjado de metilo. Ambas formas se determinan por titulación con un ácido fuerte (sulfúrico o clorhídrico). Dado que la AT de las aguas superficiales y subterráneas se debe por el contenido principalmente de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas, los cuales a su vez se hidrolizan en el agua generando como producto de la hidrólisis el ión hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ).

Sin embargo, pueden estar presentes algunas otras sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos que en menor proporción pueden contribuir a la AT. La ecuación 4 muestra la fórmula general para determinar la AT, la cual al igual que la DT se expresa en mg/L como  $\text{CaCO}_3$ , mientras que en la Figura 5 se muestran las especies iónicas en función del pH, así como las fases de la alcalinidad determinada por el método de titulación.

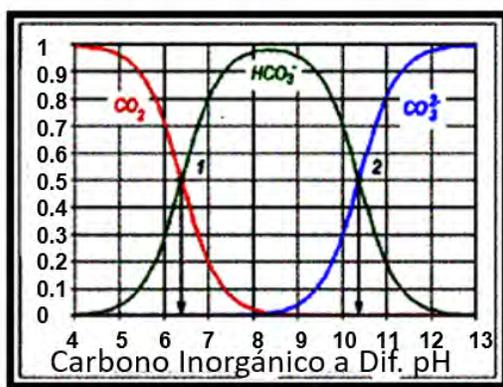
$$AT = AF + AAM \quad (4)$$

Donde:

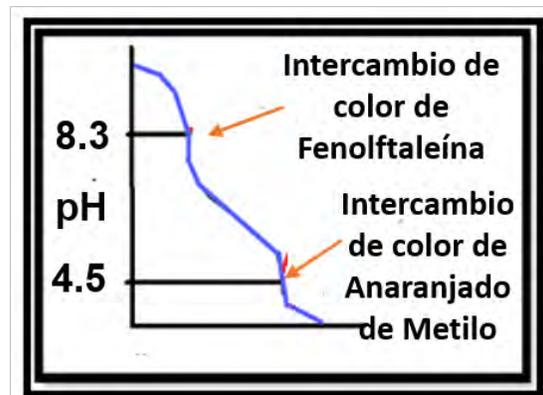
$AT$  = Alcalinidad total

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

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



a)



b)

Figura 5. a) Variación de las especies iónicas en función del pH y b) fases en la titulación del agua para determinar la alcalinidad [37].

Al igual que la dureza también la alcalinidad total puede ser clasificada dependiendo del valor obtenido, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 7 Clasificación del agua de acuerdo a su alcalinidad [35].

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

## 2.2.5 Temperatura

La temperatura es la medida de la energía cinética de las moléculas y expresa la cantidad de calor que contiene una solución, ya sea en grados Kelvin (K) o en grados Celsius (°C). La solubilidad de minerales (iones) depende de la temperatura, algunos son más solubles a medida que aumenta la temperatura, a esto se le llama solubilidad directa o normal.

La temperatura del agua debe estar siempre por debajo de 25 °C o por encima de 50 °C. En el rango de temperatura de 25 °C - 50 °C existe un alto riesgo de proliferación de bacterias, especialmente de *Legionella* spp., y debe realizarse un análisis de agua.

## 2.2.6 pH

El pH indica el grado de acidez o basicidad de una solución y sus valores están comprendidos en una escala del 0 al 14, siendo 7 el valor medio. Este valor corresponde a una solución neutra, es decir, donde la concentración de iones hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) e hidroxilo (OH<sup>-</sup>) es la misma. Valores por debajo de 7 indican soluciones ácidas y valores por encima indican soluciones básicas o alcalinas. Para una desinfección eficaz con cloro, el pH debe ser inferior a 8. El pH óptimo depende del agua y los materiales utilizados en el sistema de distribución de agua potable, pero el rango por lo general es de 6,5 a 8 y puede extenderse a 9,5.

El pH es un parámetro importante para comprobar la eficacia del tratamiento del agua y del potencial corrosivo de las tuberías del sistema de distribución de la misma. La Figura 6 se muestra la escala de pH en un rango de 0 a 14 unidades [38].

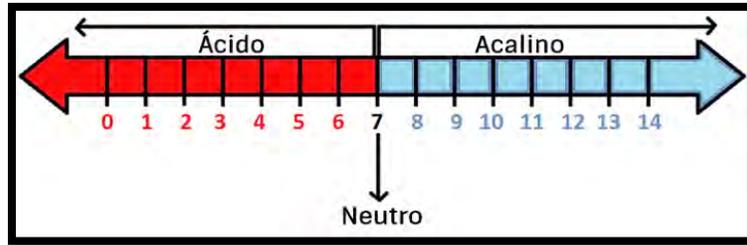


Figura 6. Escala del pH de 0 a 14 [44]

### 2.2.7 Sodio

Es el metal alcalino más frecuente en la composición de las aguas y además el único presente en cantidades significativas en las aguas naturales. En el agua de mar es el ión metálico más abundante, con concentraciones de alrededor de 10,000 mg/l. Su efecto en las membranas es que no precipita. Los efectos sobre la salud humana se ven relacionados a los problemas cardiovasculares. Cuantitativamente puede determinarse por una técnica llamada fotometría de llama.

### 2.2.8 Sulfatos

Contribuyen a la salinidad del agua, en ocasiones suele alcanzar concentraciones de 2,000 mg/l, el contenido máximo permisible por la reglamentación sanitaria es de 250 mg/l. El problema de los sulfatos en el proceso de desalación por ósmosis inversa es que pueden formar precipitados de calcio y magnesio sobre las membranas. Se puede determinar la cantidad de sulfatos en el agua por medio del método de Nefelometría.

### 2.2.9 Nitratos

En concentraciones mayores a 45 mg/l en agua para consumo doméstico pueden ser indeseables, especialmente para los niños, ya que puede ocasionar cianosis. Los nitratos no pueden ser eliminados por evaporación, se debe recurrir a la desmineralización o a la separación por membranas. La cantidad de nitratos se puede cuantificar por medio de 3 métodos los cuales son: Método espectrométrico ultravioleta selectivo, Método del electrodo de nitrato y el Método cromatográfico de iones.

## 2.3 Desalinización

El proceso de separación de agua o sal, a partir de agua salada, es un proceso termodinámico que requiere de energía. Un proceso ideal de desalinización es considerado como un proceso de separación reversible, en el cual las entradas y salidas del fluido están en las mismas condiciones de presión y temperatura, a pesar de que el calor y/o trabajo estén siendo aplicados.

El mínimo trabajo necesario para desalar agua con un total de sólidos disueltos de 3500 mg/l, es de alrededor de 0.7 kWh/m<sup>3</sup>, suponiendo una reversibilidad termodinámica completa. En la práctica, los procesos de desalinización, están lejos de ser reversibles. Ya sea aplicando calor y/o trabajo, como resultado se obtiene en la salida, un fluido con distinta presión y temperatura, en comparación con el fluido de entrada. Sin embargo, las más eficientes tecnologías de desalación, tienen un requerimiento de energía de 4-5 kWh/m<sup>3</sup>.

Los procesos de desalación pueden ser clasificados con base al cambio de fase, tipo de energía que usa y separación del solvente y soluto [39].



Figura 7. Procesos de Desalación: Ósmosis Inversa (RO), Electrodiálisis (ED), Flashing en Múltiple Etapa (MSF), Destilación en Múltiple Efecto (MED), Compresión de Vapor (CV) [39]

En general, los procesos de desalación, pueden ser clasificados en dos categorías [40]:

- a) Los procesos que separan el agua del agua salada:
  - Los procesos de destilación
  - Los procesos de membrana
- b) Los procesos que separan la sal del agua salada:
  - Electrodiálisis
  - Intercambio Iónico

Actualmente las tecnologías para la desalación de agua de mar o agua salobre, solo los procesos de Flashing en Múltiple Etapa (MSF), Destilación en Múltiple Efecto (MED) y el proceso de membrana de Ósmosis Inversa (RO), han tenido aplicaciones comerciales a gran escala. En años recientes, se ha tenido un gran interés en los procesos híbridos, que consisten en combinaciones de algún proceso de destilación con la Ósmosis Inversa.

La Tabla 8 muestra una comparación de costos aproximados de producción (USD/m<sup>3</sup>) y consumos energéticos (kWh/m<sup>3</sup>) entre tecnologías térmicas y de membranas a nivel global.

*Tabla 8. Comparación de costos aproximados de producción y consumos energéticos entre tecnologías térmicas y de membranas [41].*

<b>Tecnología</b>	<b>Costo de Producción (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo Energético</b>	<b>Recomendable para</b>
<b>Ósmosis Inversa (RO)</b>	0.6	2.4 a 2.8 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar y salobre
<b>Electrodialisis (ED)</b>	0.32	2 a 2.5 kWh/m <sup>3</sup>	Agua salobre
<b>Destilación Multiefecto (MED)</b>	1.5	3.4 a 4 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar
<b>Destilación Flashing Multietapa (MSF)</b>	1.10	5 a 8 kWh/m <sup>3</sup>	Agua de mar

## *2.4 Desalinización de Agua usando Energía Solar*

La integración de fuentes de energías renovables como la solar, geotérmica y eólica con sistemas de potabilización, promete ser una solución viable a la escasez de agua potable y al cambio climático. Sin embargo, sólo el 1% del total del agua potabilizada en plantas tratadoras en el mundo se produce con energías renovables [42].

Las energías renovables y las energías convencionales se pueden combinar para alimentar plantas potabilizadoras (Ver figura 8). En cuanto a las aplicaciones con energía solar, la mayoría de los métodos de potabilización según se reporta en la literatura [43], hacen uso de paneles fotovoltaicos para generación o cogeneración de energía. La experiencia en combinar energía solar térmica con tecnologías de ósmosis inversa es muy limitada [44].

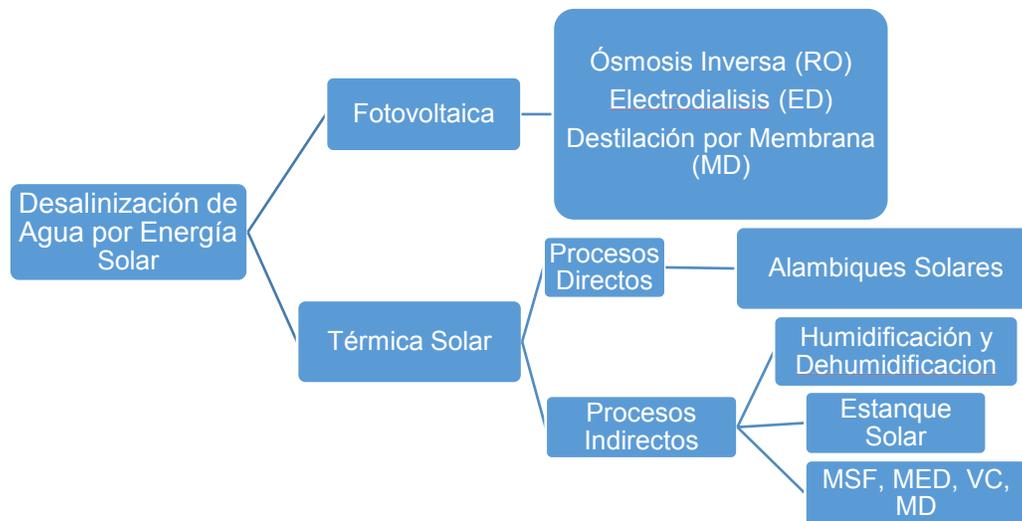


Figura 8. Posibles configuraciones de recursos de energía solar con tecnologías de desalinización de agua [43]

### 2.4.1 Destilación Solar

Los procesos por destilación se basan en el ciclo hidrológico natural del agua. Los destiladores solares consisten de un recipiente oscurecido que se llena con agua salada o agua salobre, como se muestra en la figura 9. El recipiente es cubierto por un vidrio inclinado que permite la transmisión de energía solar y la condensación del agua. La radiación solar entra al recipiente y la temperatura del agua se eleva hasta lograr la evaporación; debido a la diferencia de presión parcial y a la diferencia de temperatura el vapor de agua se condensa en el cristal inclinado y las gotas de agua se colectan en un receptáculo.

La producción de agua será en bajas cantidades, pero la calidad del agua será alta. Ha sido posible incrementar la cantidad de agua producida acoplado a los destiladores solares colectores planos, colectores con tubos evacuados, concentradores de disco o aerogeneradores [45].

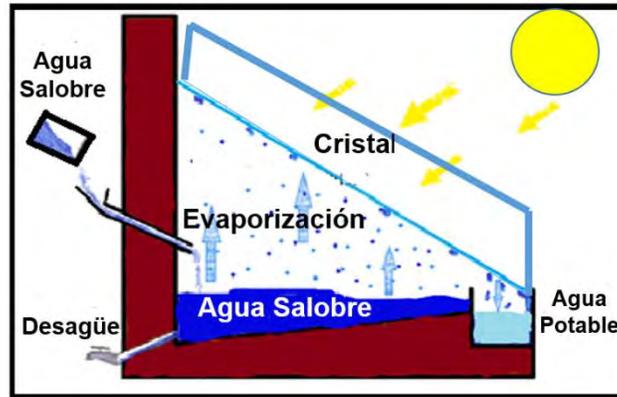


Figura 9 Diagrama representativo de un destilador solar simple [46]

## 2.4.2 Evaporación Instantánea Multietapa (MSF)

En estos sistemas, el agua salada es calentada sobre su temperatura de saturación en un recipiente llamado calentador de salmuera, el proceso de calentamiento se logra haciendo circular vapor de agua que rodeará a la tubería que contiene el agua salada, transmitiéndole calor. El vapor de agua disminuye su temperatura al hacer la transferencia y por lo tanto se condensará y tendrá que ser recirculado y calentado para convertirse en vapor nuevamente. Es en esta parte inicial del proceso donde se requiere una fuente externa de calor.

Ya que el agua salada ha alcanzado la temperatura de operación se envía a la primera etapa. Esta etapa es un contenedor que se encuentra a baja presión, de tal manera que el agua comenzará a hervir de forma instantánea o súbita (flash), convirtiéndose en vapor.

El vapor generado por la ebullición se convierte en líquido al ser condensado en tubos que interconectan las etapas, es decir, intercambiadores de calor. Estos tubos transfieren calor al calentador de salmuera, reduciendo así la cantidad de calor necesaria para alcanzar la temperatura de operación en el calentador de salmuera. Ya que sólo una parte del agua salada se evapora en una primera etapa, la fase líquida restante es enviada a la siguiente etapa, la cual se encontrará a una presión menor que la anterior, logrando así nuevamente una ebullición instantánea. Estos sistemas consisten en varias etapas donde la presión disminuye progresivamente, logrando evaporar agua en forma sucesiva. En la última etapa permanece agua que no se evaporó, la cual tendrá una alta concentración de sales disueltas, llamado fluido remanente o de salmuera. Además, se habrá colectado la mayor parte del agua condensada, que es el fluido producido.

La figura 10 muestra la representación de un sistema de evaporación instantánea multietapa impulsado parcialmente por energía solar. Se observa que

los colectores solares proporcionan la energía necesaria para elevar la temperatura del calentador de salmuera. La diferencia de presiones se logra usando bombas eléctricas de vacío.

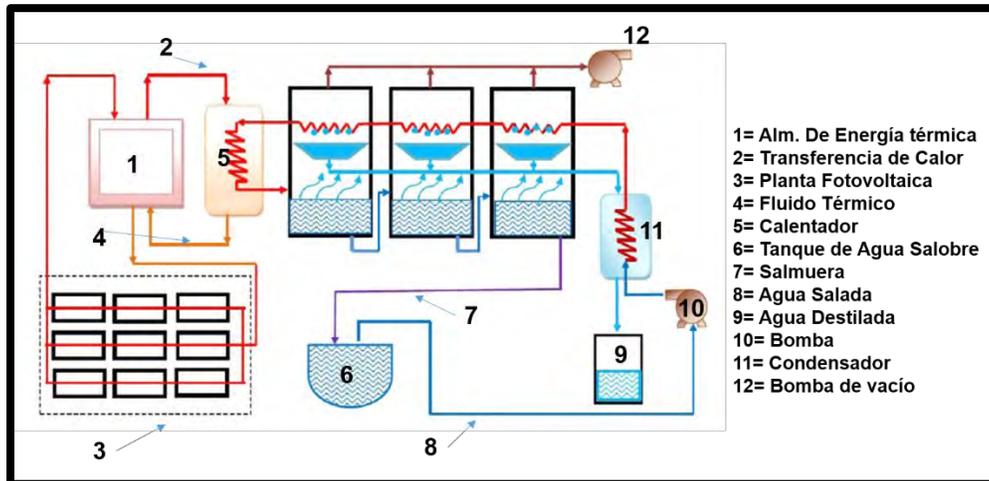


Figura 10. Planta de desalinización de evaporación multietapa impulsada por energía solar [47]

### 2.4.3 Destilación Multiefecto (MED)

Este proceso también utiliza el principio de reducción de presión en etapas sucesivas que usa el proceso MSF. En estos sistemas las etapas se le llaman efectos, los cuales consisten de un recipiente, un intercambiador de calor y dispositivos para el transporte de los diferentes líquidos entre los efectos. Existe una gran diversidad de diseños que se emplean para el proceso de intercambio de calor, por ejemplo, diseños con tubos verticales con películas delgadas de agua descendiendo, diseños con tubos horizontales, o bien con placas por donde desciende la salmuera. También existen diferentes métodos para introducir el agua salada al sistema y hacia los efectos, sin embargo, en general un proceso de MED se puede describir en las siguientes etapas:

El agua salada (precalentada) es atomizada para cubrir la superficie del evaporador. El evaporador usualmente es arreglo de tubos verticales con películas delgadas de agua descendiendo, que rápidamente promueve la ebullición y la evaporación del agua salada. El vapor de agua contenido en los tubos del evaporador es generado gracias a una fuente externa de calor, en los sistemas convencionales se usan generadores eléctricos o calentadores. El agua condensada en el evaporador es reciclada para su reutilización.

Las superficies de los efectos posteriores serán calentadas por el vapor de agua pura producido en el efecto inmediato anterior. Después de haber intercambiado su calor en el efecto siguiente, este condensado pasa a formar parte

del agua producida. El vapor producido en el último efecto es condensado en un intercambiador de calor separado, llamado condensador final, el cual será enfriado por el agua salada entrante, que así será precalentada para hacer más eficiente el proceso. Ya que sólo una parte del agua salada es evaporada en cada efecto, el agua restante de cada efecto tendrá una alta concentración de sales y formará parte de la salmuera o agua remanente. Debido a que el proceso de MED requiere temperaturas menores de operación que el método de Evaporación Instantánea Multietapas, estos sistemas tienen mejor compatibilidad con colectores de energía solar térmica [48].

La figura 11 muestra un proceso donde un campo de colectores solares se encarga de transmitir energía térmica hacia el primer evaporador. En este sistema una bomba se encarga de impulsar el agua salada hacia el condensador final.

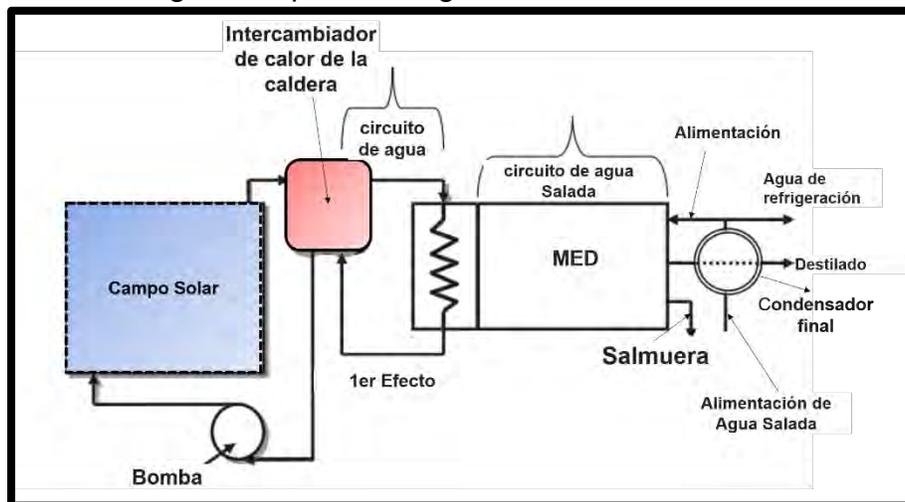


Figura 11. Diagrama esquemático de un sistema MED [49]

## 2.4.4 Compresión de Vapor (VC)

El proceso de compresión de vapor se utiliza generalmente en unidades desalinizadoras de pequeña o mediana escala, o bien se acompaña de otros procesos (MED). A diferencia de los sistemas anteriores, el calor para evaporar agua proviene de la compresión de vapor en lugar del intercambio de vapor directo proveniente de un calentador. En estos sistemas se aprovecha el principio de la reducción del punto de ebullición a partir de la disminución de la presión [50]. En este proceso el agua salada de alimentación es precalentada por una fuente de energía externa, posteriormente se hace atomizar sobre un arreglo de tubos, de tal manera que alcanza su punto de ebullición y se evapora parcialmente. El vapor producido es entonces comprimido por un compresor típicamente mecánico (VC), logrando elevar la temperatura del vapor para hacerlo circular dentro del

evaporador. El agua que ha sido condensada en esta última etapa forma parte del agua pura producida, mientras que la parte del agua salada que no se logra evaporar contiene altas concentraciones de sal, es decir, es agua de salmuera.

La figura 12 muestra la representación de un sistema VC, acoplado a un sistema MED, donde un campo de colectores solares producen la energía térmica suficiente para impulsar una turbina, la cual impulsa un compresor mecánico. Existen también sistemas híbridos impulsados por energía solar de paneles fotovoltaicos y por aerogeneradores que si necesitan de más energía, son auxiliados por la red eléctrica externa.

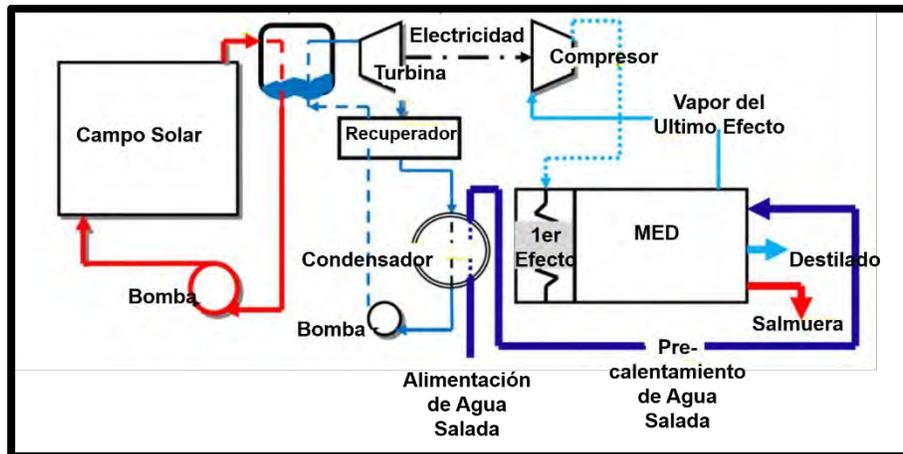


Figura 12. Diagrama esquemático de un sistema MED-VC

## 2.4.5 Electrodialisis (ED)

La electrodialisis es un proceso electroquímico en el cual se mueven sales selectivamente a través de membranas, dejando atrás agua dulce como producto. Las sales son compuestos químicos formados por cationes y aniones que se disocian cuando se encuentran disueltos en agua. Cuando se aplica un voltaje de corriente directa a una solución salina, los iones con carga positiva tienden a viajar a través de la solución hacia el electrodo de carga negativa, mientras que, los iones con carga negativa tienden a migrar hacia el electrodo de carga positiva.

Es posible desalinizar agua aprovechando este efecto, usando membranas selectivas de intercambio iónico, que permitan el paso de iones positivos o iones negativos, pero no ambos. Los sistemas de electrodialisis usan arreglos de membranas alternados, donde una membrana selectiva de aniones es seguida de una membrana selectiva de cationes.

Se colocan espaciadores para generar un canal que lleve el agua de producto, mientras que el siguiente canal lleva la solución concentrada o salmuera. Cuando se aplica un voltaje de corriente directa, el sistema se polariza, llevando los

aniones hacia el electrodo positivo, disminuyendo el contenido salino del agua en el canal de agua de producto. Los aniones pasan a través de la membrana selectiva de aniones, pero no pueden pasar más allá de la membrana selectiva de cationes, quedando atrapados en el canal de salmuera. De manera equivalente, los cationes tienden a moverse en dirección opuesta, es decir, hacia el electrodo negativo, pasando a través de la membrana selectiva de cationes y quedando atrapados en el canal de salmuera. Usualmente la polaridad de la corriente se invierte periódicamente para prevenir la acumulación de sales en las membranas. El agua de alimentación deberá ser previamente tratada para eliminar materiales que dañen las membranas o que puedan bloquear los canales del arreglo. En los sistemas convencionales es necesario usar una bomba para hacer circular el agua salada a través del sistema, además, es necesario un circuito inversor que transforme la corriente alterna en corriente directa.

Un diagrama esquemático de un sistema de electrodiálisis se presenta en la figura 13. Los sistemas impulsados por energía solar cuentan con paneles fotovoltaicos con o sin baterías para energizar el sistema de ED proponen un sistema con paneles fotovoltaicos para impulsar una desalinización parcial [52], un diagrama de este sistema se muestra en la figura 14.

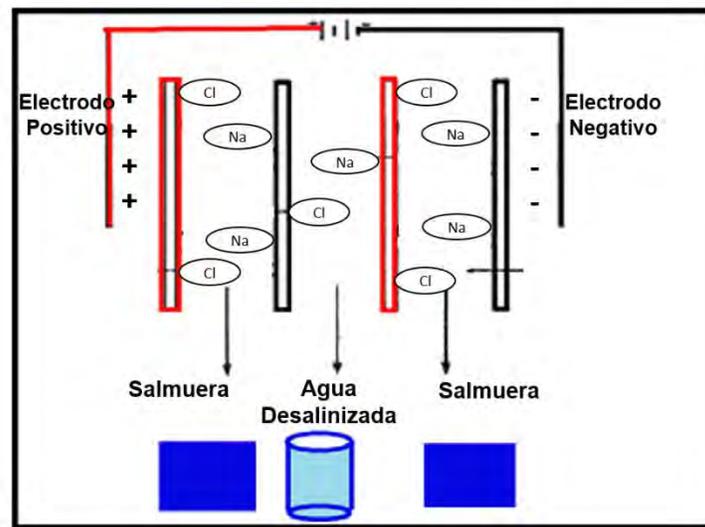


Figura 13. Diagrama del funcionamiento de un sistema de electrodiálisis [53]

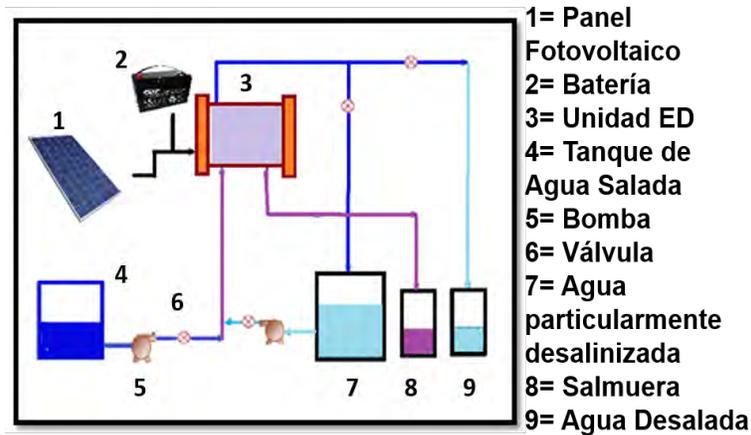


Figura 14. Diagrama del funcionamiento de un sistema de electrodiálisis impulsado por energía fotovoltaica [52]

## 2.4.6 Destilación por Membrana (MD)

La destilación por membrana consiste en separar la fase líquida de la fase gaseosa de un líquido que se evapora. Para lograr la separación se emplea una membrana hidrofóbica, que supone una barrera que impide el paso de la fase líquida, permitiendo sólo el paso de vapor de agua a través de sus poros. La separación se logra por la diferencia de presión de vapor entre la superficie de la membrana, ocasionada por una diferencia de temperatura. La propuesta de acoplar módulos de destilación por membrana con colectores solares es conveniente debido a que los sistemas MD pueden tolerar condiciones de operación intermitente. Actualmente existen módulos de destilación por membrana acoplados a colectores solares planos, colectores solares de tubos evacuados, estanques solares, colectores parabólicos y paneles fotovoltaicos [54].

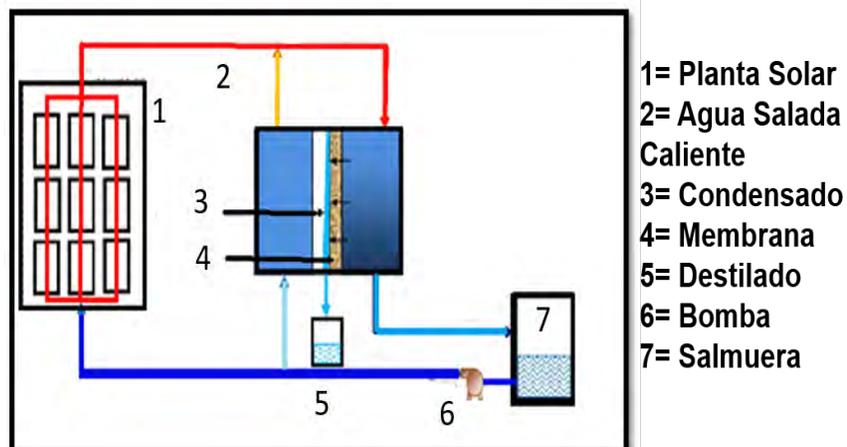


Figura 15. Módulo de Destilación por membrana solar [54]

## 2.5 Ósmosis Inversa (RO)

La ósmosis Inversa es un proceso de separación por membrana, donde las membranas son permeables al agua, pero esencialmente impermeables a solutos (un ejemplo de ello es el cloruro de sodio). Las membranas de ósmosis inversa tienen un tamaño de poro de 0.3 a 0.5 nm, que es menor al tamaño de poro de otro tipo de membranas de separación (Ultrafiltración y Nanofiltración), por lo tanto pueden retener partículas más pequeñas que estas últimas [55].

La figura 16 muestra el tamaño relativo de algunos solutos que pueden ser removidos por cada clase de membranas. En general, la principal aplicación de la ósmosis inversa ha sido la desalinización de agua salobre subterránea o de agua de mar.

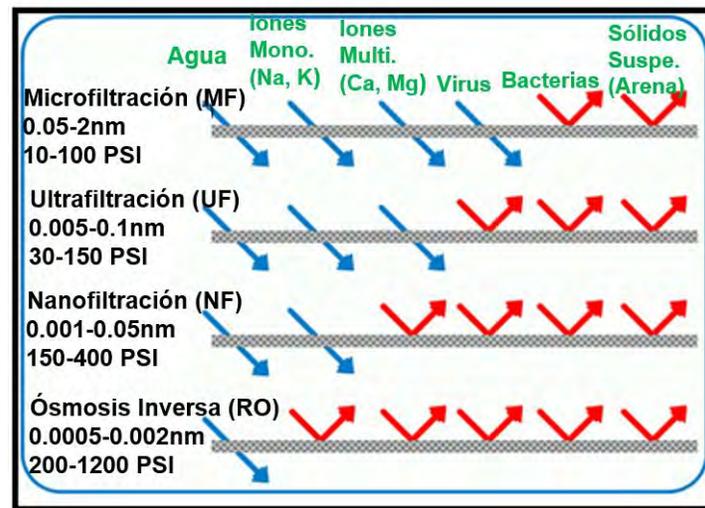


Figura 16. Tamaño de poro de membranas de separación [55]

### 2.5.1 Mecanismo de Transporte en Membranas

El modelo de transporte más aceptado que describe el mecanismo de permeado a través de membranas es llamado modelo de solución-difusión. De acuerdo a ese modelo, el permeado se disuelve en la frontera de la membrana, después se difunde a través de ella y finalmente se desorbe de la frontera de la membrana. La separación ocurre debido a la diferencia de solubilidad entre las diferentes especies, por parte, y por la diferencia de movilidades de las mismas a través de la membrana, todo esto originado por un gradiente de concentración. Debido a este gradiente de concentración, estadísticamente ocurre un transporte de materia desde la región de mayor concentración de permeado hacia la región de menor concentración. Cuando dos volúmenes adyacentes con una diferencia de concentración de permeado son separados por una interfaz, simplemente por la diferencia en el número de moléculas entre cada volumen, un mayor número de

moléculas de influente se desplazarán del lado concentrado hacia el lado menos concentrado, mientras que menos moléculas lo harán hacia la dirección contraria. Este concepto fue reconocido por Fick teóricamente y experimentalmente en 1855 [56].

El diámetro promedio del poro en una membrana es difícil de medir directamente y en la mayoría de los casos se infiere gracias al tamaño de las moléculas que permean la membrana. Las membranas de ósmosis inversa tienen una densa capa con poros no visibles, donde ocurre la operación. En estas membranas el flujo permeado es mucho más bajo que en membranas con poros más grandes. Las moléculas permean la membrana a través de los espacios libres que se forman entre las cadenas del polímero, que están en el rango de 0.5 nm de diámetro. Estas cadenas y los espacios que forman son transientes en el tiempo en el cual ocurre el proceso de difusión, además cambian su posición y su volumen, por lo que no se puede considerar que son poros fijos de diámetro determinado.

## 2.5.2 Principio de Operación

La ósmosis inversa y la ósmosis normal son procesos directamente relacionados. Si una membrana semipermeable tiene de un lado solución salina y del otro agua pura, el agua pasará a través de la membrana del lado del agua pura hacia el lado de la solución salina. Este proceso es llamado Osmosis Normal (Figura 17a), si se aplica presión hidrostática al lado de la solución salina, el flujo de agua puede ser retardado e inclusive revertido si la presión es suficiente.

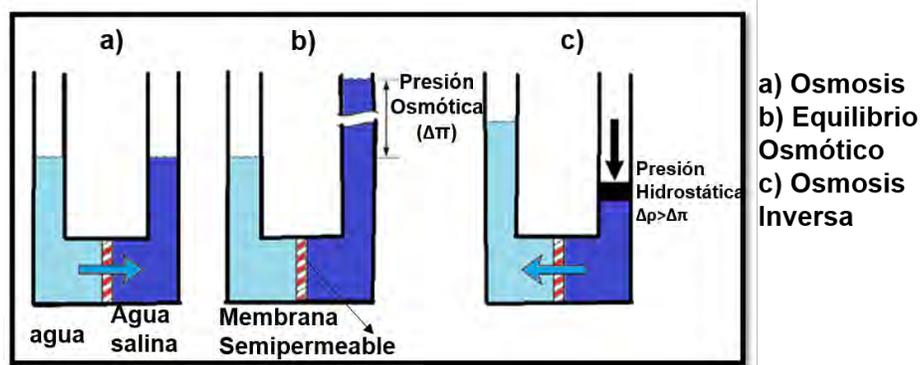


Figura 17. a) Ósmosis, b) Equilibrio Osmótico y c) Ósmosis Inversa [55]

La presión hidrostática necesaria para detener el flujo de agua es llamado presión osmótica (figura 17b). Si se aplica una presión mayor a la presión osmótica al lado de la solución salina, el flujo de agua se invierte, y el agua empieza a fluir del lado de la solución salina hacia el lado del agua pura. Este proceso es llamado Ósmosis Inversa (figura 17c) y es el método más usado para producir agua pura a partir de soluciones salinas.

### 2.5.3 Membranas

Una membrana se puede considerar que es una barrera o película permeoselectiva entre dos medios fluidos, que permite la transferencia de determinados componentes de un medio al otro a través de ella y evita o restringe el paso de otros componentes [57].

En la figura 18, se ilustra un esquema de un sistema de separación por membranas. La alimentación de agua se hace en un módulo donde existe una membrana, de este módulo salen dos corrientes: el rechazado, que contendrá las sustancias que no han logrado pasar a través de la membrana, y el permeado, que contendrá las sustancias que sí pueden pasar a través de la membrana.

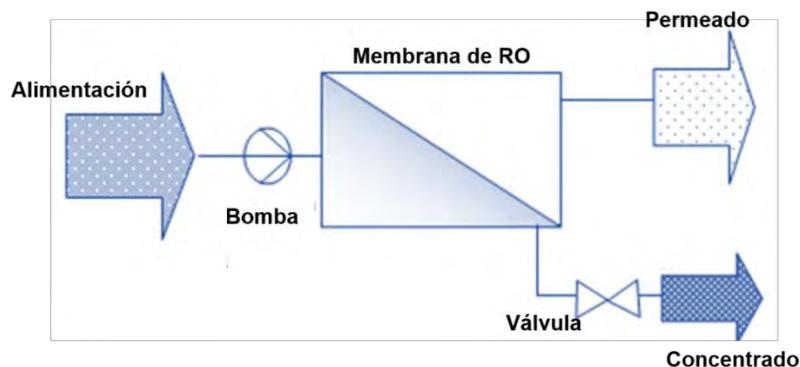


Figura 18. Representación esquemática de un proceso de separación por membrana [57]

### 2.5.4 Configuración y Módulos de Membranas

Para utilizar industrialmente las membranas con el fin de que se puedan soportar las diferentes presiones de trabajo, deben colocarse de una determinada manera adoptando distintas formas o configuraciones [59]. El módulo es la pieza central de la instalación de membrana. La palabra módulo, en esta tecnología, deriva de modular, ya que la capacidad de producción de una planta de estas características se consigue instalando en paralelo y/o en serie varias unidades elementales de producción o módulos. Por lo tanto, “módulo” es la agrupación de membranas, con una configuración determinada, que forma una unidad elemental de producción.

A nivel comercial, se encuentran disponibles membranas configuradas con diversas geometrías, a saber: [60]

- Membranas planas
- Membranas tubulares
- Membranas en forma de espiral

Los módulos de placas fueron los primeros, y están constituidos por un grupo de membranas planas, de forma rectangular o circular y se apoyan en mallas de drenaje o placas porosas (Figura 19). Las membranas se separan con espaciadores con espesor del orden de 2 mm [61].

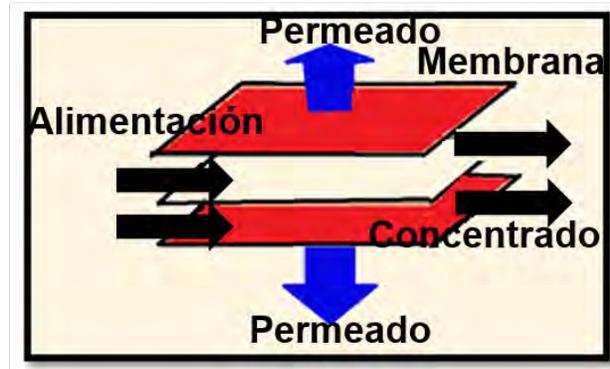


Figura 19. Módulo de Placas [61]

Los módulos tubulares se fabrican utilizando como soporte un tubo perforado o poroso, dentro del cual van las membranas tubulares. (Figura 20).

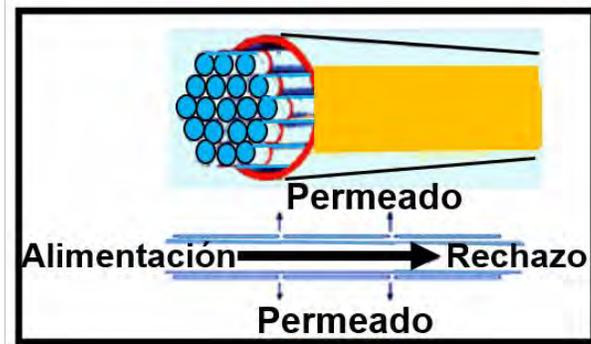


Figura 20. Modulo Tubular [61]

Los módulos espirales están constituidos por membranas planas que se enrollan en espiral en torno a un tubo central, de plástico con orificios. En la figura 21 se ilustra en forma esquemática el funcionamiento de un módulo en espiral [61] por el tubo central fluye el permeado. El módulo se forma a partir una lámina rectangular de membrana semipermeable que se dobla por la mitad, de tal forma que la capa activa quede en su exterior.

En el interior de las dos mitades se coloca un espaciador que permite que el permeado de la membrana circule y se colecte en el tubo central. Sobre la capa activa de la membrana sigue una malla que tiene canales de distribución, con el fin de repartir uniformemente sobre la membrana el flujo de alimentación a tratar.

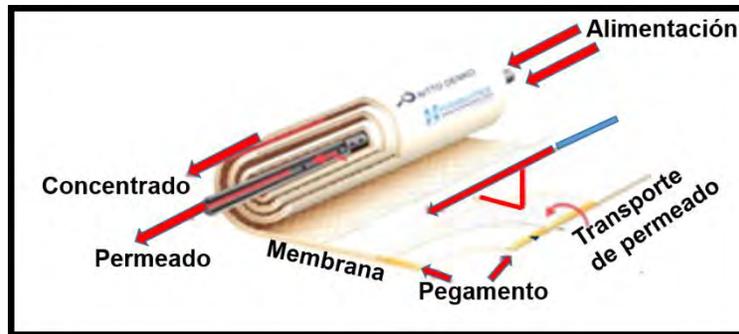


Figura 21. Módulo de espiral [61]

### 2.5.5 Ensuciamiento de membranas y técnicas de limpieza

El ensuciamiento (fouling) de la membrana es un ensuciamiento provocado por el crecimiento de células en la superficie o por las precipitaciones del producto cuando éste está sobresaturado. El ensuciamiento de la membrana es causado por la deposición y acumulación del material retenido en la superficie, o dentro de los poros de la membrana [62]. Se presenta tanto como resultado de la polarización por concentración, como también por la afinidad entre compuestos de la alimentación y la membrana, tales como aceites, grasas, proteínas, compuestos orgánicos, iones metálicos, etc. El ensuciamiento es el mayor problema de los procesos de filtración por membranas. Reduce el flujo y la capacidad de rechazo de sales y aumenta el consumo energético y la presión de alimentación. Se puede controlar con un adecuado pre-tratamiento, la adición de productos químicos y un manejo adecuado de la operación del sistema [63].

En los procesos de membranas se presentan casi inevitablemente los fenómenos de incrustación y ensuciamiento. Conforme avanza el tiempo de operación, la producción disminuye, la rapidez de esta reducción varía de acuerdo con el grado de ensuciamiento en cada caso particular. Para restaurar las características de funcionamiento de la planta es necesario realizar una limpieza periódica de las membranas.

Esta limpieza puede realizarse de diversos métodos:

- **Limpieza mecánica:** consiste en pasar una esponja o cepillo para desprender la suciedad depositada en la membrana. No es aconsejable, ya que puede rayar y destruir la capa activa.
- **Limpieza con permeado a presión o Flushing:** consiste en hacer llegar a las membranas un permeado libre de sustancias disueltas, de tal forma que arrastre la suciedad.

- **Limpieza química:** consiste en recircular a través de los módulos una serie de productos químicos disueltos en agua capaces de disolver las precipitaciones o eliminar los depósitos.

## *Capítulo 3: Metodología y Materiales*

En este capítulo se describe una introducción al software ROSA, la simulación del sistema desalinizador, el diseño de la unidad desalinizadora PV-RO, así como la construcción del arreglo experimental del sistema desalinizador. Esta sección contiene información de los equipos utilizados en la instrumentación del prototipo experimental. Se menciona cómo se realizó la preparación de las soluciones salinas sintéticas utilizadas como agua de alimentación, así como los parámetros físicos y químicos que se evaluarán para determinar la calidad del agua de alimentación y del agua de permeado. Finalmente, se describen el control establecido en el sistema cumpliendo con la normatividad mexicana y una breve introducción de la evaluación económica del sistema.

### *3.1 Software ROSA (Reverse Osmosis System Analysis)*

El programa ROSA es un software desarrollado por Dow Chemical para el cálculo de instalaciones industriales de ósmosis inversa. ROSA son las siglas de “Reverse Osmosis System Analysis” (Sistema de Análisis de Ósmosis Inversa), y se trata de una herramienta asistida por ordenador para el diseño y operación de sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración para el tratamiento y purificación de aguas.

#### *3.1.1 Variables de Interés en ROSA*

En este apartado se explicarán las principales variables y parámetros que afectan al funcionamiento de un sistema de ósmosis inversa, y particularmente, a todos aquellos que se utilizan en el programa ROSA.

##### **Presión de la alimentación**

La presión que se comunique a la corriente de alimentación es la que permite el paso a través de la membrana de las moléculas de disolvente desde el medio hipertónico al hipotónico. La verdadera fuerza motriz no sólo depende de la presión de alimentación, sino que resulta de la diferencia de presiones a ambos lados de la membrana, junto con la diferencia de presiones osmóticas.

## Temperatura

La temperatura que poseen las corrientes de la instalación también es una variable de gran importancia en los sistemas de ósmosis inversa. La temperatura afecta tanto a la presión osmótica como a la permeabilidad del agua a través de la membrana: normalmente se acepta que el flujo de permeado se incrementa alrededor de un 3 % por cada °C de incremento de temperatura. Sin embargo, el paso de sales también aumenta con la temperatura a la misma tasa que el flujo, por lo que al incrementarse la temperatura a flujo de permeado constante, la calidad del permeado disminuye.

## Flujos

- **Caudales (“Flow”)**: son los más utilizados, e indican volumen por unidad de tiempo (en las unidades seleccionadas en este apartado, m<sup>3</sup>/h). Dentro de estos caudales se encuentran variables de gran importancia en una instalación de ósmosis inversa:

-“System Feed Flow”, que indica el caudal total de agua de alimentación que está entrando al sistema.

-“Feed Flow”, indica el caudal de agua que está entrando al paso seleccionado en ese momento.

-“System Permeate Flow”, que indica el caudal total de permeado que sale del sistema.

-“Permeate Flow”, que indica el caudal de permeado que sale del paso seleccionado en ese momento.

### *3.1.2 Parámetros de Calidad en ROSA*

**SDI:** El SDI (Silt Density Index) es un parámetro que indica el grado de presencia de partículas coloidales en el agua a tratar. Es un parámetro de gran importancia en ROSA, ya que las partículas coloidales son responsables de ensuciamientos y obstrucciones en las membranas, provocando una disminución de su rendimiento.

El SDI se determina mediante un procedimiento estandarizado y reproducible, ampliamente aceptado en la industria. Con este procedimiento se estima el grado de ensuciamiento de las membranas debido a la contaminación por partículas coloidales presentes en el agua de alimentación.

La cantidad de SDI se calcula mediante la ecuación:

$$SDI = \frac{1 - \frac{t_1}{t_2}}{T} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

$t_1$  es el tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al inicio de la prueba.

$t_2$  es el tiempo necesario para filtrar 500 ml de muestra, al final de la prueba.

$T$  es el tiempo entre mediciones (15 min).

Valores de SDI altos indicarán una alimentación con gran cantidad de sustancias coloidales, por lo que interesarán bajos valores de SDI.

**pH:** El pH es un parámetro que indica la concentración de iones hidronio ( $H_3O^+$ , o simplificado como  $H^+$ ) presentes en una disolución acuosa. Su valor oscila entre 0 y 14, y se define como:

$$pH = -\log(a_{H_3O^+}) \quad (6)$$

Donde:

$a_{H_3O^+}$  = Concentración molar.

El pH es de gran importancia en un sistema de ósmosis inversa, ya que puede afectar a la calidad y vida útil de la membrana, especialmente si esta es orgánica. Los valores de pH han de ser referidos a la temperatura de medición, ya que varían con ella. Cuanto mayor sea la temperatura a la que se encuentre la alimentación, menor rango de pH soporta la membrana.

**LSI:** El LSI (Langelier Saturation Index) indica el grado de saturación del agua con respecto al carbonato cálcico ( $CaCO_3$ ), correlacionándolo con el pH como variable principal. A pH bajo, los carbonatos e hidrogenocarbonatos se convertirán en ácido carbónico, por lo que no habrá riesgo de deposiciones ni precipitaciones de  $CaCO_3$ . La elevada concentración de  $H_2CO_3$  provocará que el agua presente características corrosivas. A pH elevados, habrá gran concentración de  $CO_3^{2-}$  y muy poco ácido carbónico, por lo que el agua no tendrá propiedades corrosivas.

La fórmula para calcular el LSI es la siguiente:

$$LSI = pH - pH_s \quad (7)$$

Donde:

$pH$  = pH medido en el agua.

$pH_s$  = pH de saturación en  $CaCO_3$ , que se calcula mediante la fórmula:

$$pH_s = (9.3 + A + B) - (C + D) \quad (8)$$

Con:

$$A = (\log [TDS] - 1) / 10$$

$$B = -13.12 \cdot \log (T(K)) + 34.55$$

$$C = \log [Ca^{2+} \text{ en forma de } CaCO_3] - 0.4$$

$$D = \log [\text{Alcalinidad Total Carbonatada}]$$

Un agua con un LSI de cero corresponderá a un agua en condiciones óptimas de estabilidad: ni corrosiva ni incrustante. Un agua con un LSI positivo corresponderá a un agua con propiedades incrustantes, en la que se darán precipitaciones y deposiciones de carbonato cálcico. Un agua con un LSI negativo corresponderá a un agua con propiedades corrosivas.

### 3.1.3 Selección de las Membranas

Comúnmente la selección de las membranas se realiza de acuerdo a las características del influente a tratar, dependiendo del estudio de calidad del agua y el lugar de origen de la misma, se debe seleccionar las membranas. En este caso se requieren membranas de baja presión con la finalidad de reducir costos respecto al sistema de bombeo.

La simulación para elegir las membranas se debe hacer en el software libre ROSA, ya que el tipo de membranas con las que dispone el programa son adecuadas para un correcto funcionamiento. Si se desea más información de la selección de membranas y el programa en general, se encuentran en el Anexo A. El estudio de Calidad de Agua obtenido del laboratorio del Instituto Mexicano De Tecnologías del Agua (IMTA) con el cual se probó el sistema que se presenta en la tabla 9. El influente presenta valores por arriba de los permitidos por la norma NOM-SSA1-127-1994 y poder obtener valores por debajo de la normatividad en el permeado del sistema RO, lo cual es uno de los objetivos más importantes del trabajo.

Tabla 9. Estudio de Calidad de Agua para Selección de Membranas

Parámetros	Concentración [mg/l]
Bicarbonatos	495
Carbonatos	<0.188
Sulfatos	779
Calcio	41.9
Sodio	455.6
SDT	1514
pH	8.5

Con las características del influente a tratar se seleccionan las membranas RE4040-BLN (Brackish-Low por sus siglas en inglés), a baja presión y realizando la simulación se obtiene una bomba que maneje presiones menores a 100 PSI como se muestra en la siguiente figura:

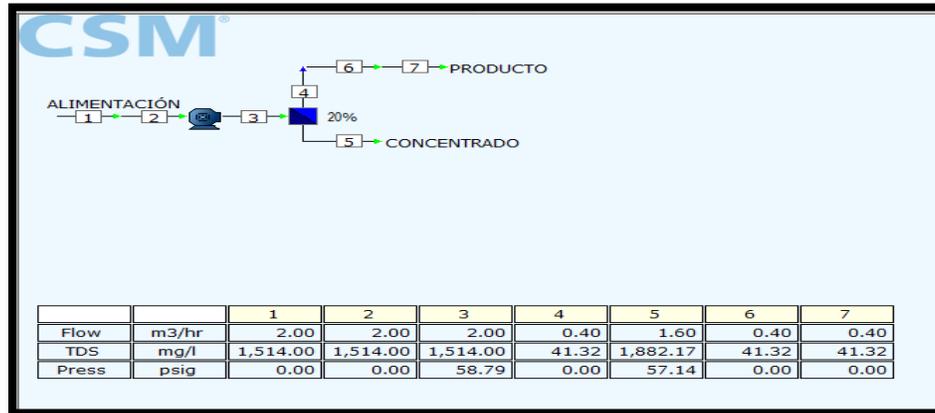


Figura 22. Simulación con las membranas seleccionadas

Algunas de las características de la membrana seleccionada son:

- Rango de Flujo de Permeado = 9.8 m<sup>3</sup>/día
- Porcentaje Nominal de Rechazo de sales = 99.20%
- Área efectiva de Membrana 7.9 m<sup>2</sup>
- Presión de Operación < 150 PSI
- Flujo máximo de operación = 68 l/min

Dimensiones de la membrana:

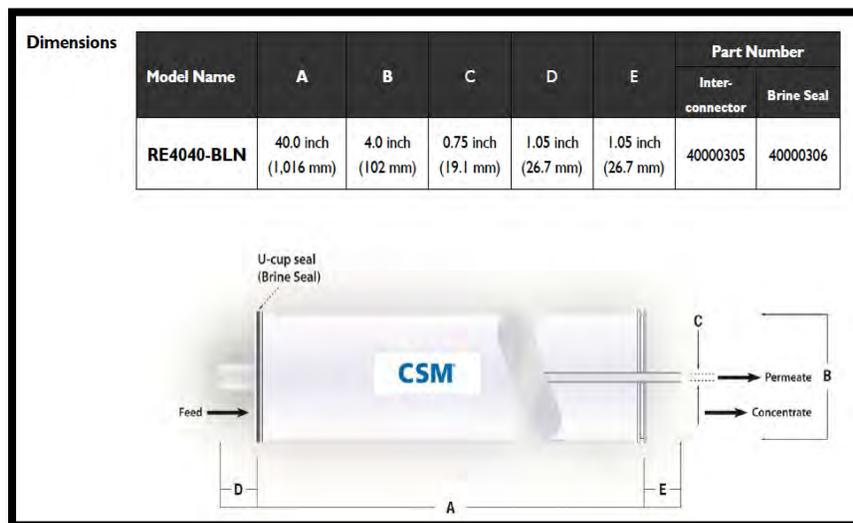


Figura 23. Dimensiones de la Membrana

Toda la información necesaria (ficha técnica) que proporciona el proveedor se encuentra en el Anexo B.

### 3.2 Selección de la bomba

A partir de las características del agua a tratar y las condiciones de operación se llevó a cabo la simulación usando el software ROSA 9.1 dando como resultado una presión de trabajo no mayor a 150 PSI, la cual es la presión ideal de trabajo para las membranas, por lo tanto se seleccionó una bomba con estas características. Con ayuda de la siguiente ecuación (9) [102] se evaluó la potencia de operación que debería de tener la bomba. A continuación se presenta este cálculo:

$$Potencia (HP) = \frac{presion (bar) * caudal (\frac{l}{min})}{450} \quad (9)$$

$$Presion (bar) = \frac{potencia (HP) * 450}{caudal (\frac{l}{min})}$$

$$Presion (bar) = \frac{0.75 * 450}{30 (\frac{lbs}{min})}$$

$$Presion (bar) = \frac{0.75 * 450}{30 (\frac{l}{min})}$$

$$Presion (bar) = 11.25$$

$$Presion (PSI) = 163.16745$$

Las membranas soportan una presión no mayor de 150 PSI y una bomba de  $\frac{3}{4}$  Hp de potencia es suficiente para generar la presión de trabajo, con un poco de margen superior.

### 3.3 Diseño del Sistema Desalinizador

El sistema desalinizador se diseñó usando el software SolidWorks. Este es un software tipo CAD (diseño asistido por computadora) que permite realizar diseño y modelado mecánico en 2D Y 3D. SolidWorks permite modelar piezas y realizar ensambles, para poder exportar de ellos los datos técnicos que son de información fundamental para la posterior construcción.

Debido a que se desea un prototipo compacto y portátil, que sea resistente a condiciones climatológicas ambientales, tanto días soleados, lluviosos, fríos y de bajo peso (<50 kg), se optó por la idea de colocar un perfil de aluminio serie 25, para

la estructura que soportará las membranas, el cual se muestra en la siguiente figura (figura 24):

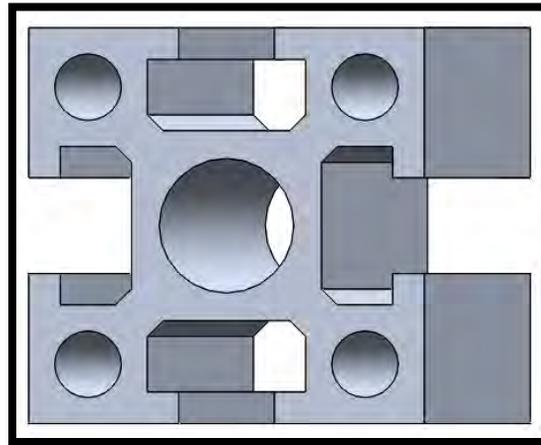


Figura 24. Perfil de Estructura

El diseño final que se desea construir está conformado por una estructura de aluminio, manguera para permeado de 10 mm de diámetro, tubería CPVC cedula 80 de  $\frac{3}{4}$ " , un filtro de microfiltración (MF) como pretratamiento, 2 membranas de ósmosis inversa, una bomba de  $\frac{3}{4}$  de potencia y un tanque de almacenamiento, tal y como se muestra en la figura 25.

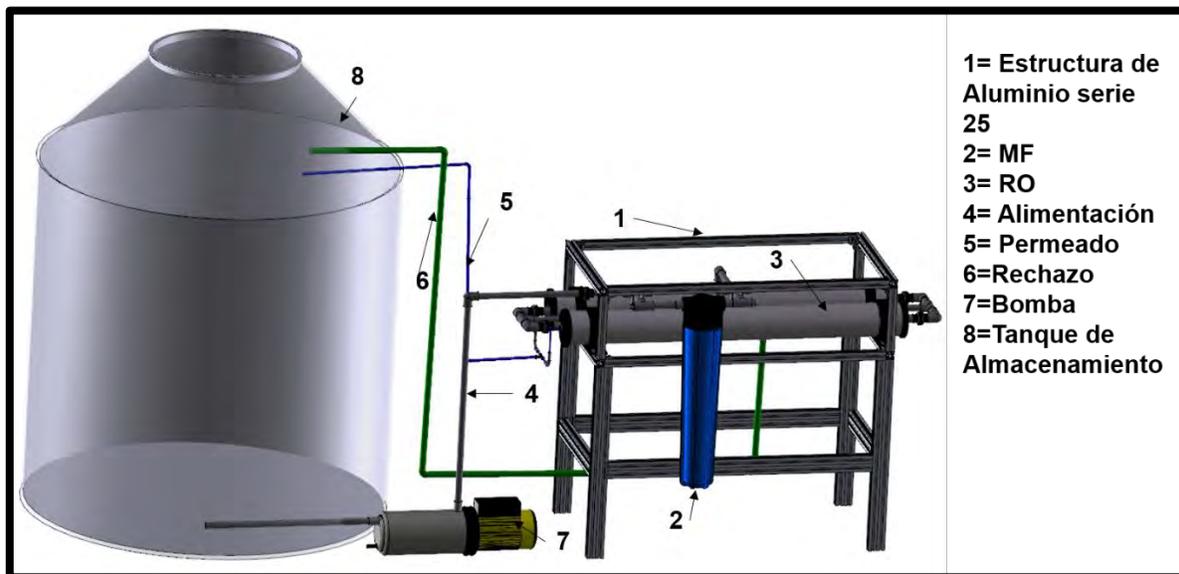


Figura 25. Diseño final del Sistema Desalinizador

### 3.4 Construcción del Sistema Desalinizador

El principal objetivo del proyecto es el diseño y la construcción del sistema desalinizador con fines de potabilización. De acuerdo a la figura 26, el sistema desalinizador construido tiene como dimensiones más significativas de la estructura 20 cm x 45 cm x 86 cm con unas patas de 60 cm y las membranas tienen 101.6 cm de largo. El mismo sistema integra una entrada de alimentación y 2 salidas de producto, una de rechazo y otra de permeado (Ver figura 26).



Figura 26. Sistema Desalinizador Construido

### 3.5 Metodología aplicada a nivel laboratorio

#### 3.5.1 Descripción del modelo físico

La Figura 27 muestra un diagrama conceptual de un sistema de desalinización de agua salobre RO-PV. El sistema está compuesto por un filtro de microfiltración (MF), módulos de ósmosis inversa (RO) y sistema de bombeo fotovoltaico (PV-B).

La unidad RO está compuesta por dos membranas de poliamida RO con una superficie total equivalente de 30.6 m<sup>2</sup>. Funciona con una capacidad nominal de permeado 12 l/min con una alimentación de 60 l/min, manteniendo una relación 1:5 de permeado respecto a la alimentación.

El sistema de PV-B consiste en una planta fotovoltaica con una potencia promedio de 1.92 kW compuesta por 6 módulos de silicio policristalino con una potencia nominal de 240 W. Cada módulo, que suministra energía a una bomba centrífuga sumergible de corriente directa, modelo SQFlex 16 SQF-10 sin banco de baterías.

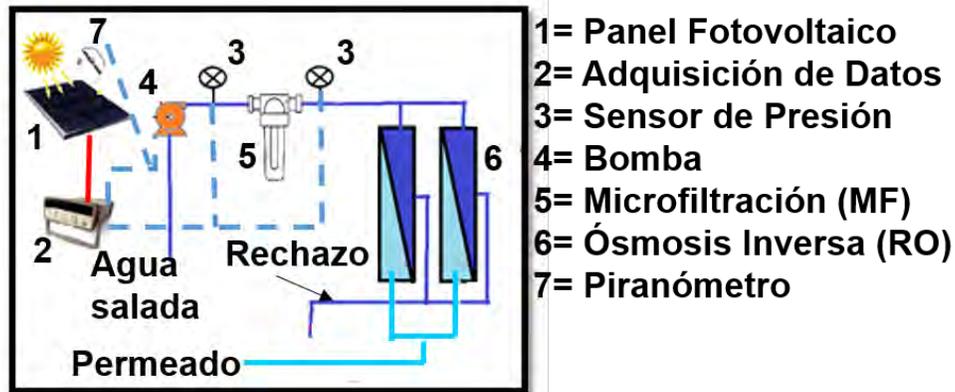


Figura 27. Modelo de desalinización evaluado a nivel laboratorio

### 3.5.2 Preparación del Influyente

Se preparó un volumen de 400 l de un agua “sintética” (influyente) con altas concentraciones sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ); simulando las características del agua subterránea (ver Figura 28).

Las muestras obtenidas tanto del influente como de los efluentes (agua de rechazo y agua de permeado), se enviaron al Laboratorio de Calidad del Agua del IMTA para la determinación de aniones (carbonato y bicarbonatos) y cationes (sodio y calcio) y SDT como se muestra en la tabla 9.



Figura 28. Etiquetado de las muestras

### 3.5.3 Instrumentación del Sistema Desalinizador

- **Temperatura**

Para medir la temperatura se usaron termopares tipo T (cobre-constantan) calibre 28 con una incertidumbre de  $\pm 0.5$  °C. Para calibrar los termopares se utilizó un termo pozo de referencia de marca HortScientific, modelo 9100S. Una vez calibrados los termopares son ubicados en el arreglo experimental. Específicamente en las corrientes de alimentación y temperatura ambiente.

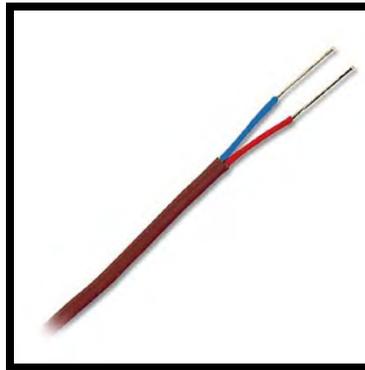


Figura 29 Termopar constantan tipo T

- **Flujo**

El flujo fue medido a la salida del sistema en las corrientes de permeado. Para este caso, empleando la técnica de volumetría, se estimó un error relativo promedio  $\pm 5\%$ .

- **Adquisición de datos**

La adquisición de datos se llevó a cabo con una unidad Keysight modelo 34972A empleando una tarjeta 4970A/34972<sup>a</sup>. (Ver Figura 30).



Figura 30. Fotografía del Sistema de Adquisición de datos

- **Destilado**

Con el fin de cuantificar el destilado se hizo uso de una probeta de vidrio graduada con una incertidumbre de  $\pm 5\%$  con una capacidad máxima de 1 l.

- **Radiación**

Para medir la radiación solar se utilizó un piranómetro clase A marca Hukseflux type SR12-T1 con certidumbre de  $\pm 0.1\%$  (ver Figura 31).



Figura 31. Fotografía del Pirómetro Utilizado

- **Presión**

Para medir la presión en el sistema se utilizaron equipos piezométricos marca Dwyer solar con certidumbre de 1.0 % de 0-100 PSI.

- **Conductímetro**

Los parámetros como sólidos disueltos totales (SDT), temperatura (T), potencial de iones hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE) se midieron in situ con un multiparamétrico marca HACH modelo 3333 con una exactitud de  $\pm 0.01$ . (Vea Figura 32).



Figura 32. Conductímetro marca HACH

- **Corriente**

Para medir la corriente se utilizó un sensor modelo ACS712-30A, trabaja con un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo. El sensor entrega una salida de voltaje proporcional a la corriente de 0 V a 5 V (Vea figura 33).

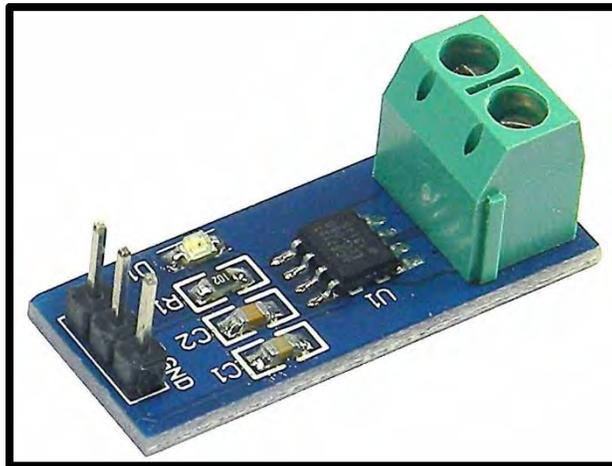


Figura 33. Sensor de corriente Modelo ACS712-30A

### 3.5.4 Desarrollo experimental

El experimento se realizó a cielo abierto en la ciudad de Jiutepec, Morelos bajo condiciones controladas (concentraciones, temperatura y presión) utilizando una solución concentrada con alto contenido en sulfatos como influente. Con el objetivo de realizar la evaluación del sistema, se evaluaron dos concentraciones diferentes. Los valores nominales de las concentraciones evaluadas fueron 615 mg/l, 1098 mg/l. En cada prueba, la concentración permanece constante mientras que la radiación solar es un parámetro libre que cambia a lo largo del día solar en un intervalo de 273.5 W/m<sup>2</sup> a 735.2 W/m<sup>2</sup>. La irradiación fue medida sobre la horizontal con un pirómetro de primera clase con una incertidumbre de  $\pm 1.0\%$ .

La radiación, así como las demás variables involucradas tales como como voltaje, corriente, temperatura, etc., se midieron en forma directa mediante un sistema de adquisición de datos 34972A "Data Acquisition". Sin embargo, el flujo volumétrico del permeado e influente se midió mediante la técnica de volumetría. La presión en el sistema se midió de dos maneras, por medio de manómetros y por medio de transductores de presión ubicados a la entrada y salida, tal como se representa en diagrama conceptual de la Figura 27.

La evaluación del sistema consiste en determinar la efectividad de la remoción de  $\text{SO}_4^{2-}$ , la cantidad y calidad del producto que se obtiene para fines de consumo humano.

### 3.5.5 Eficiencia de la Recuperación de Permeado (RR)

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

$$RR = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_{\text{Inf}}} \times 100 \quad (10)$$

Donde:

$\dot{m}_d$  = flujo másico del destilado.

$\dot{m}_{\text{Inf}}$  = flujo másico de la corriente principal que ingresa al sistema.

### 3.5.6 Eficiencia de la Recuperación de Permeado (RR)

Las eficiencias de remoción de sales y sulfatos se determinan relacionando del contenido en las muestras antes y después del tratamiento. Por ejemplo, considerando el caso de la conductividad eléctrica, el porcentaje de la eficiencia se escribe como

$$\eta_{\text{sul}} = \frac{CE_R}{CE_{\text{Inf}}} \times 100 \quad (11)$$

Donde

$CE_R$  = cantidad de sales rechazadas por el sistema ( $CE_{\text{Inf}} - CE_p$ ).

$CE_{\text{Inf}}$  = conductividad eléctrica alimentada.

$CE_p$  = conductividad eléctrica del permeado

## 3.5 Metodología aplicada en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. (CIO)

### 3.6.1 Descripción del modelo físico

La figura 34 muestra un diagrama conceptual de un sistema de desalinización de agua salobre RO-PV usado en la ciudad de Aguascalientes en las instalaciones del CIO. El sistema está compuesto por un filtro de microfiltración (MF), módulos de ósmosis inversa (RO) y sistema de bombeo fotovoltaico (PV-B). La unidad RO está compuesta por dos membranas de poliamida RO con una superficie total equivalente de 9.36 m<sup>2</sup>.

El sistema de PV-B consiste en una planta fotovoltaica con una potencia nominal de 0.54 kW compuesta por 2 módulos de silicio policristalino con una potencia nominal de 270 W cada módulo, que suministra energía a una MOTOBOMBA TECNO15-3/1115 con una carga de 115.5 mca (metros de columna de agua), 2 baterías selladas de gel 12Vcd, óptima tapa roja, Inversor de Voltaje 1,500-4500W 24Vcd-115Vca Onda Senoidal Modificada Marca Invercom, Controlador Ep Solar MPPT para Batería con Pantalla 32A 12/24V, un sensor analógico de conductividad eléctrica.

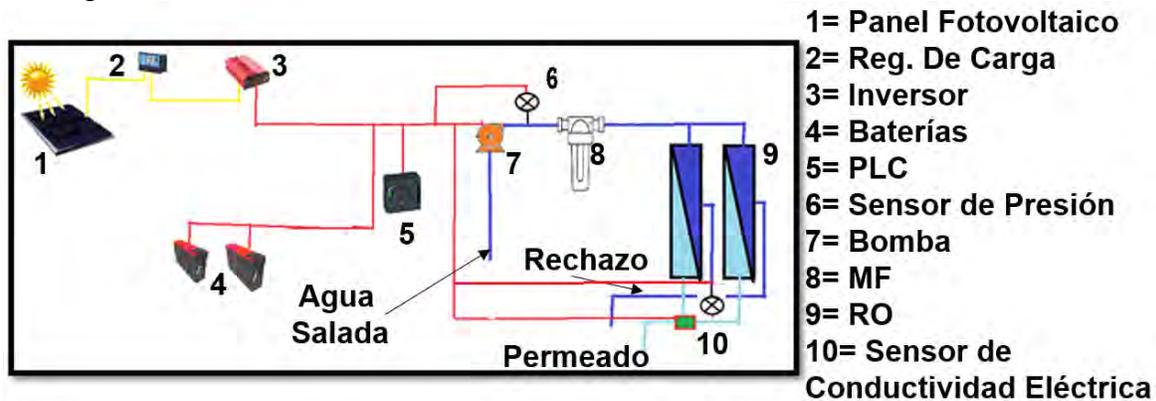


Figura 34. Modelo de Sistema Desalinización usado en CIO-Ags

El acoplamiento de los paneles fotovoltaicos se realiza en una configuración en paralelo de modo que es posible sumar sus capacidades de corriente. Se conectaron 2 baterías de gel en serie, con la finalidad de hacer funcionar el sistema, se utilizó también un controlador de carga y un inversor para tener un configuración modo isla o autónomo.

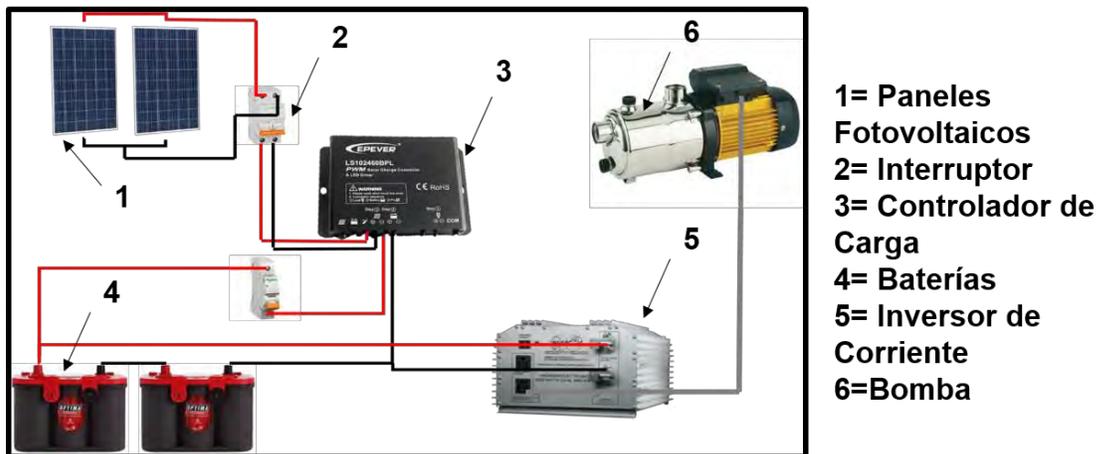


Figura 35. Distribución de Energía Eléctrica en el Sistema Desalinizador

Con respecto a la hidráulica, se mantiene una cantidad constante de agua salobre en un tanque de almacenamiento y en cual se recircularan el permeado y el rechazo para conservar las mismas concentraciones iniciales en todo el experimento. (Ver Figura 25).

La preparación de influente con un volumen de 500 l de agua “sintética” con altas concentraciones Sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), Sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) y bicarbonato de sodio ( $\text{NaHCO}_3$ ); simulando las características del agua subterránea.

### 3.6.2 Desarrollo Experimental

En la ciudad de Aguascalientes, el experimento se realizó a cielo abierto bajo condiciones controladas utilizando una solución concentrada con alto contenido de sulfatos como influente. Como componentes se usaron, un sensor de conductividad, 2 baterías, un inversor de voltaje de 1500W por que la carga principal es de corriente alterna (ca), un controlador de carga de 20 A, 2 paneles de 270 W, como se observa en la figura 35.

Para comprobar el buen funcionamiento del sistema, se evaluaron tres concentraciones diferentes. Los valores nominales de las concentraciones evaluadas fueron 689 mg/l, 1245 mg/l y 1510 mg/l. En cada prueba, la concentración permanece constante y la evaluación del sistema consiste en determinar la efectividad de la remoción de  $\text{SO}_4^{2-}$ . La eficiencia de remoción se realiza a cielo abierto bajo condiciones de cielo despejado y parcialmente nublado, que representa condiciones típicas para las épocas del año en el estado de Aguascalientes.

El flujo volumétrico del permeado e influente se midió mediante la técnica de volumetría cada 10 minutos. La conductividad eléctrica (CE) en el sistema se midió con un conductímetro marca HACH donde al final de la evolución se promedió la conductividad eléctrica en ese permeado.

### 3.6.3 Dimensionamiento Fotovoltaico

El sistema desalinizador aunado a una planta fotovoltaica debe garantizar su correcto funcionamiento, ya que se desea obtener una planta potabilizadora totalmente autónoma y los aparatos electrónicos como sensores, Bomba, regulador de carga, etc. Son energizados por los paneles fotovoltaicos en corriente alterna ya que se dispone de un inversor.

El territorio nacional destaca en el mapa mundial de territorios con mayor promedio de radiación solar anual con índices que van de los 4.4 kWh/m<sup>2</sup> por día en la zona centro, a los 6.3 kWh/m<sup>2</sup> [7]. México es considerado a nivel mundial como uno de los países con mayor potencial de recursos solares. La ciudad de Aguascalientes en promedio dispone de 5.8 kWh/m<sup>2</sup> [7].

Ya que se desea generar totalmente la energía demandada por el sistema desalinizador, es conveniente dimensionar un sistema aislado o modo isla, también llamado autónomo, el cual está compuesto por paneles fotovoltaicos, baterías de almacenamiento de energía, regulador de carga e inversor que garantizarían no depender de la red eléctrica y proveer la energía suficiente para el buen funcionamiento del sistema. Para un buen dimensionamiento fotovoltaico modo isla, se debe llevar el siguiente orden de pasos:

1. Determinar la tabla de consumo eléctrico.
2. Determinar el número de paneles fotovoltaicos.
3. Determinar el número de baterías.
4. Determinar la corriente mínima necesaria de trabajo del controlador de carga
5. Determinar la potencia mínima necesaria de trabajo del Inversor de voltaje (Vcd a Vca)

La siguiente tabla presenta los componentes a utilizar, la potencia que demanda y los días de uso por semana.

Tabla 10. Aparatos Eléctricos a utilizar en el Sistema Desalinizador

Aparato	Nº	P (Watt/unidad.)	t (h)	días de uso	Días/semana	E(kWh/día)
Bomba	1	550	5	5	7	1.9642
Factor de Carga de la Bomba (75%)		412.5 Reales				
Sensores	1	50	5	5	7	0.1785
	<b>PT</b>	<b>462.5 W</b>			<b>TOTAL</b>	<b>2.1427</b>

La tabla anterior presenta los componentes que consumirán energía en el sistema desalinizador, los cuales serán suministrados por el arreglo fotovoltaico en el cual, según los aparatos y el tiempo en el cual se utilizarán se obtiene una energía eléctrica de demanda de 2.1427 kWh/día, lo cual será generado por 2 paneles

fotovoltaicos de 270 W con dimensiones de 1.640 m x 0.992 m x 0.035 m calculados con la ecuación 12, con un área de arreglo de 3.25 m<sup>2</sup>.

- **Número de Paneles fotovoltaicos**

El número de paneles fotovoltaicos se determina por la siguiente ecuación:

$$\# \text{ de panel} = \frac{ET * F_s}{HSP * POTENCIA DEL PANEL} \quad (12)$$

Donde:

*ET* = Energía total demandada [Wh]

*HSP* = Hora solar pico [h]

*F<sub>s</sub>* = Factor de Seguridad = 1.25

$$\# \text{ de panel} = \frac{2142.7 \text{ Wh} * 1.25}{5 \text{ h} * 270 \text{ W}}$$

$$\# \text{ de panel} = \frac{2142.7 \text{ Wh} * 1.25}{5 \text{ h} * 270 \text{ W}} = 1.98 \approx 2$$

Tabla 11. Numero de Paneles Fotovoltaicos a utilizar en el Sistema Desalinizador

PANELES SOLARES	
Potencia de panel	270 W
Corriente de Panel (Ics)	9.13 A
Voltaje de Panel (Vos)	38.23 V
No. De Paneles	2

- **Cálculo de Baterías**

Una vez calculado la cantidad de paneles fotovoltaicos a utilizar en el sistema desalinizador, es importante calcular el número de baterías necesarias para un correcto almacenamiento de energía generada, el cual se determina con la ecuación 13 y 14, donde la energía total demanda es de 2.1427 kWh/día, con un factor de eficiencia de las baterías de 0.9, un voltaje de salida es de 38.23 V por la conexión en paralelo, con 2 días de autonomía, un límite de descarga de 95% y una capacidad de batería de 60 Ah.

$$Ahr = \frac{ET}{F_e * V_s} \quad (13)$$

Donde:

*Ahr* = Capacidad promedio diaria [Ah]

*ET* = Energía total demandada [Wh].

*V<sub>s</sub>* = Voltaje de salida que depende de la conexión de los paneles.

*F<sub>e</sub>* = Factor de eficiencia = 0.9

$$Ahr = \frac{2142.7 \text{ Wh/día}}{0.9 * 38.23 \text{ V}} = 62.2751 \text{ Ah/día}$$

$$\# \text{ de Baterías} = \frac{\text{Ahr} * \text{días de Autonomía}}{\text{lim. de descarga} * \text{Capacidad de batería}} \quad (14)$$

$$\# \text{ de Baterías} = \frac{62.27 \frac{\text{Ah}}{\text{día}} * 2 \text{ días}}{0.95 * 60 \text{ Ah}} = 2.19$$

- **Cálculo de Controlador de Carga**

Para seguridad de los equipos como el inversor, las baterías y los paneles fotovoltaicos es importante determinar la capacidad mínima de corriente del regulador de carga, el cual se calcula mediante la ecuación 15, donde, la corriente de salida ( $I_s$ ) es de 18.46 A por la conexión en paralelo de los paneles fotovoltaicos.

$$I_c = I_s * F_s \quad (15)$$

Donde:

$I_c$  = Corriente del controlador [A].

$I_s$  = Corriente de salida que depende de la conexión de los paneles.

$F_s$  = Factor de seguridad = 1.20

$$I_c = 18.46 \text{ A} * 1.10$$

$$I_c = 20.306 \text{ A}$$

La corriente del regulador de carga debe ser de una capacidad mínima de 20 A para un buen funcionamiento.

- **Cálculo de Inversor de corriente**

La potencia entregada al inversor de corriente debe ser suficiente para soportar la potencia consumida por la bomba, el regulador de carga y los sensores y así garantizar un buen funcionamiento. La capacidad del inversor se calcula mediante la ecuación 16.

$$PI = PT * F_s \quad (16)$$

Donde:

$PI$  = Potencia de Inversor de Corriente [W].

$PT$  = Potencia total demandada [W].

$F_s$  = Factor de seguridad = 2

$$PI = 462.5 \text{ W} * 2$$

$$PI = 925 \text{ W}$$

La potencia mínima del inversor de corriente debe ser de 925 W para que el sistema funcione adecuadamente. La conexión del sistema fotovoltaico modo isla estará conectado como se presenta en la figura 35.

### 3.6.4 Diseño de Base para Paneles Fotovoltaicos

Es deseable un prototipo diseñado y construido totalmente, el cual implica un sistema desalinizador y un sistema fotovoltaico. El diseño para la colocación de los paneles fotovoltaicos, debe de ser lo más reducido posible para su fácil movilidad y que se contemple el inversor, las baterías y el regulador de carga.

La estructura es de perfil de aluminio 25 mm x 25 mm, ya que debe ser capaz de soportar el peso de cada panel en condiciones climatológicas, con dimensiones de 2 m x 1.4 m. En la misma estructura se debe de colocar el gabinete para colocar el regulador de carga. El inversor y las baterías se encuentran colocados sobre una base separada de la estructura para poder manipularse con mayor facilidad. (Ver figura 36).

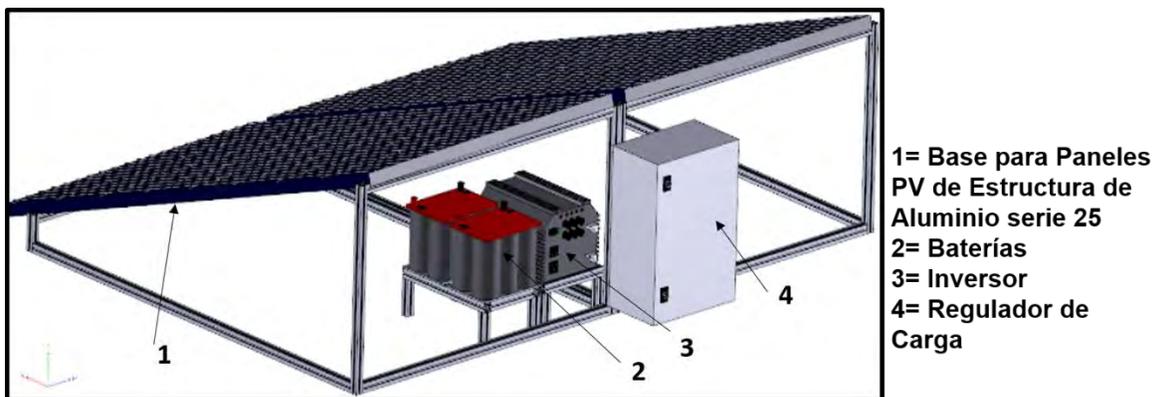
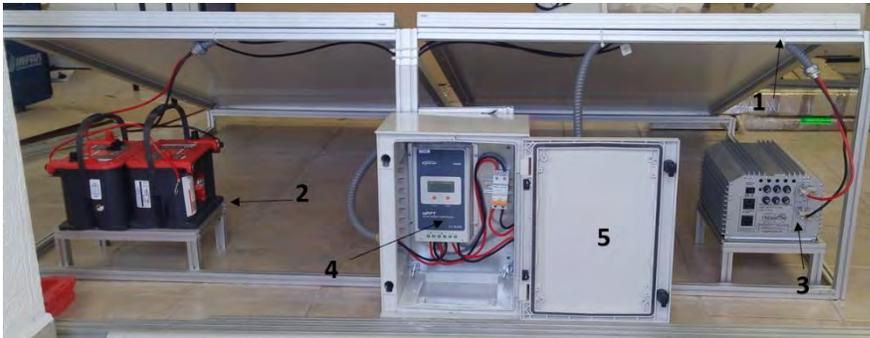


Figura 36. Diseño de Base para Paneles Fotovoltaicos

### 3.6.5 Construcción de Base para Paneles

Se desea operar el sistema con 2 paneles fotovoltaicos, ya que estos sólo cumplen la función de cargar las 2 baterías conectadas en serie y el inversor será alimentado por los 24 Vcd generados por dichas baterías para que este los convierta a 120 Vca, que serán alimentados a la bomba para extraer el agua del tanque. En la figura 37 se puede observar la base de ambos paneles con todos los componentes mencionados.



- 1= Base para Paneles PV de Estructura de Aluminio serie 25
- 2= Baterías
- 3= Inversor
- 4= Regulador de Carga
- 5= Gabinete

Figura 37. Construcción de Base para Paneles Fotovoltaicos

### 3.7 Evaluación Económica

El cálculo del costo de agua desalinizada por el proceso depende de varios factores, como son la capacidad de la planta, la calidad de agua alimentada, un proceso de pretratamiento, si este existiera, la tecnología aplicada en el sistema como la parte de control, el costo de la energía, inversiones y amortización [101].

El costo de capital lo compone: el precio del equipo, equipo auxiliar, instalación y etapa de pretratamiento del agua, por otro lado, los costos operativos anuales están conformados por los costos adicionales generados después de la instalación y durante el funcionamiento del equipo. Estos ya incluyen la amortización o cargos fijos, operación, mantenimiento y remplazo de membranas.

Para llevar a cabo la evaluación económica se replicó una metodología propuesta por los autores Banat, F. y Jwaied, N. en el 2008 [95] para estimar un costo efectivo del agua desalinizada para una planta de energía solar a pequeña escala con destilación de membrana autónoma. El análisis económico es convenientemente adoptado en el presente trabajo y discutido en la sección de resultados.

## Capítulo 4: Resultados

En este capítulo se presenta como resultados el dimensionamiento fotovoltaico, el diseño y construcción de la base para los paneles fotovoltaicos, la evaluación económica del sistema desalinizador y la evaluación del sistema de la calidad de agua y se compara con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (modificada en el año 2000) así como los efectos de la radiación en el sistema.

### 4.1 Prototipo puesto en Operación

El sistema desalinizador solar, operando totalmente se instaló en la Ciudad de Aguascalientes con datos geográficos de latitud y longitud de 21°52'56" N y 102°16'57" O respectivamente, en las instalaciones del CIO-Ags, con un promedio de irradiación de 5.8 kWh/m<sup>2</sup> por día [7]. El sistema desalinizador puede generar entre 0.5 m<sup>3</sup> y 1 m<sup>3</sup> de agua desalinizada por día.

La planta prototipo está compuesta por 2 membranas de RO, una estructura de aluminio serie 25 mm x 25 mm, un tinaco de 1,100 l, una bomba centrífuga de ¾ Hp de potencia, un inversor de corriente, un regulador de carga, 2 baterías y 2 paneles fotovoltaicos. La tabla 12 presenta un resumen de los componentes del desalinizador solar y sus características.

Tabla 12 Resumen de Componentes del Sistema Desalinizador Solar

Cantidad	Componente	Marca	Capacidad
2	Membranas de RO	CSM	
1	Tinaco	Rotoplas	1,100 l
1	Bomba Centrífuga	ESPA	¾ Hp
2	Paneles Fotovoltaicos	PERLIGHT	270 W
2	Baterías de gel	OPTIMA	12 V y 60 Ah
1	Inversor de Corriente	INVERCOM	1500-4500 W
1	Regulador de Carga	SPEVER	20 A

## 4.2 Resultados Obtenidos a nivel laboratorio

### 4.2.1 Calidad del Agua

Se evaluaron dos condiciones diferentes de calidad de agua, los valores nominales de las concentraciones de sales minerales en campo evaluadas fueron 615 mg/l y 1098 mg/l. En cada experimento, la medición se realizó por triplicado; al inicio, a la mitad y final de la prueba. Esta medición se llevó a cabo para garantizar que en cualquier momento la concentración permanezca con una desviación máxima de  $\pm 10$  mg/l respecto al valor promedio.

Las tablas 13 y 14 muestran los resultados promedio en cada prueba. Para validar estos resultados las muestras fueron enviadas a los laboratorios de calidad del agua del IMTA para su análisis (para mayor detalle ver el Anexo C).

Tabla 13. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua (SDT =615 mg/L)

Fecha de análisis: 08/12/2017					
No. Muestra	Muestra	pH (unidades)	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	SDT (mg/l)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	Influente	8.54	1,225	615	24
2	Permeado	8.53	32	16.1	25.7

Tabla 14. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua (SDT=1098 mg/L)

Fecha de análisis: 9/12/2017					
No. Muestra	Muestra	pH (unidades)	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	SDT (mg/l)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	Influente	8.45	2,120	1,098	26.2
2	Permeado	8.38	36	18	25.5

Las membranas de RO no evitan retener totalmente el flujo de las sales como por ejemplo los compuestos monovalentes presentes son capaces de atravesar a través de la membrana con diferentes tasas de transferencias en permeado y sal respectivamente. Esto tiene como consecuencia que el permeado y la sal que a bajas presiones la conductividad en el permeado sea ligeramente mayor y a presiones mayores la conductividad sea menor.

En el experimento se observó que para presiones bajas la calidad del permeado era menor llegando a valores de SDT próximos a 218 mg/l en el permeado. Sin embargo, bajo las mismas características del influente pero con

mayor presión de alimentación el valor de SDT en el permeado alcanzó hasta una concentración de 18 mg/l como se presenta en la tabla 14.

Los resultados muestran que para las condiciones experimentales que se presentan en la tabla 13 y usando la ecuación 10, la eficiencia de remoción de sulfatos fue de 97.4% mientras que para la condición de prueba de la Tabla 14 la eficiencia de remoción de sulfatos fue de 98.3%.

### 4.2.2 Efectos de la Radiación solar

Las pruebas se realizaron bajo condiciones de cielo despejado el día 8 y 9 de diciembre de 2017 con datos geográficos  $18^{\circ} 53'$  de latitud norte y  $99^{\circ} 10'$  de longitud oeste. Debido a la latitud del lugar, época del año y efectos de humedad atmosférica la máxima radiación registrada fue de  $735.2 \text{ W/m}^2$ . Durante las pruebas experimentales el voltaje de alimentación fotovoltaico permanece en un valor promedio de 327.1 V. En la gráfica de la Figura 38 se presenta el comportamiento de la corriente que demanda el sistema respecto a la irradiancia solar. La dependencia se observa cuasi lineal. La Figura 39 presenta la dependencia de la potencia requerida por el sistema respecto a la radiación solar incidente.

La dispersión periódica en la figura hace referencia a un problema de conexión eléctrica en la instalación de la bomba o a la operación del controlador de carga.

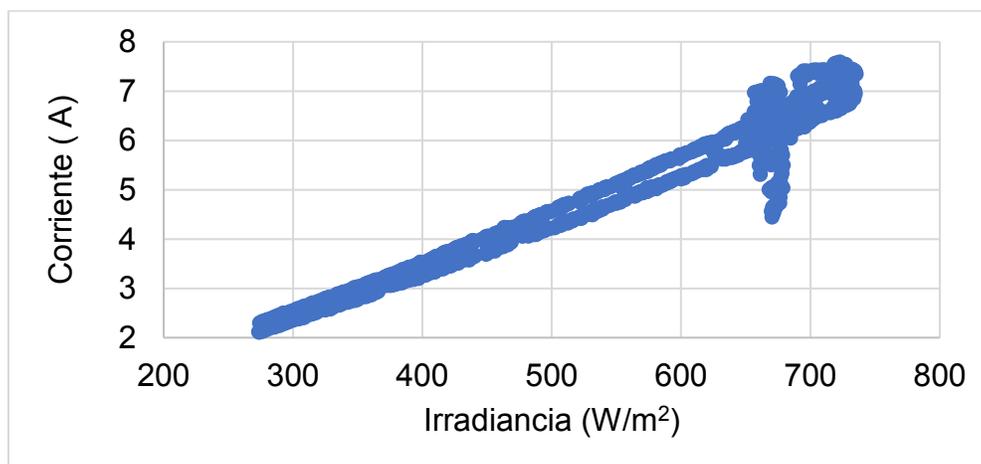


Figura 38. Comportamiento de la radiación respecto a la corriente que demanda el sistema.

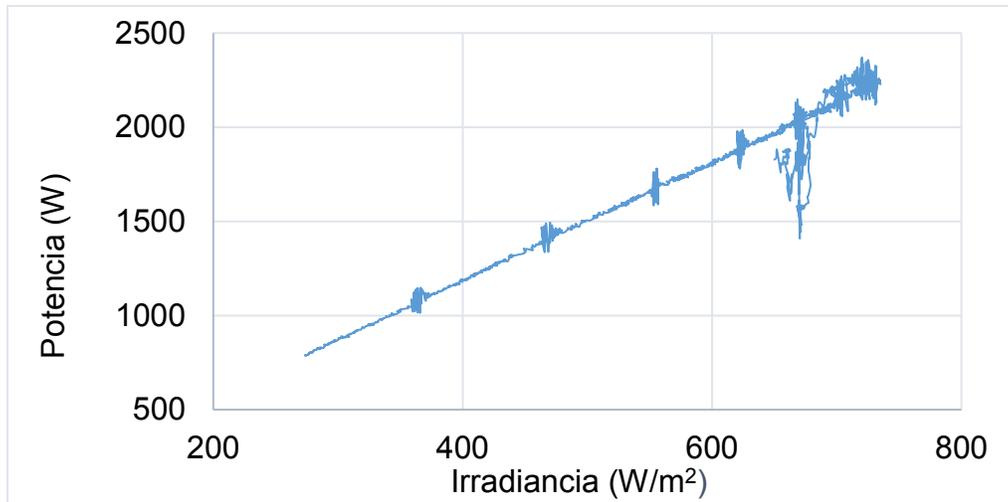


Figura 39. Potencia de salida por el sistema fotovoltaico

### 4.2.3 Evaluación del Sistema RO-PV

Con el objetivo de tener certeza en las mediciones realizadas se calibraron de los sensores de presión. Dicha calibración se realizó considerando un intervalo de presión de 39.1 a 77.2 PSI. En el experimento se observó que la unidad comienza a producir permeado a una presión de 39.1 PSI lo que equivale a una radiación incidente de 340 W/m<sup>2</sup>. La ecuación de calibración se presenta en el gráfico de la Figura 40.

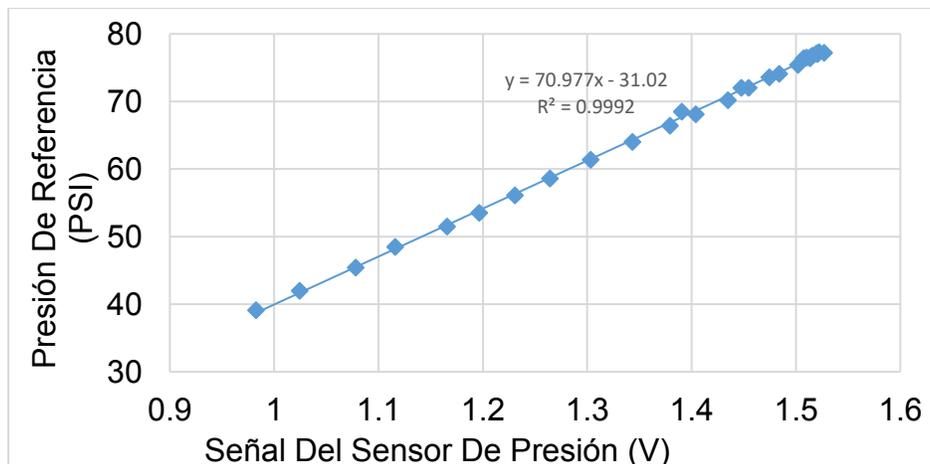


Figura 40. Ecuación de calibración de los medidores de presión

Una vez calibrado los instrumentos se determinó la presión máxima suministrada por la bomba bajo las condiciones de radiación solar incidente. Con

base en los resultados experimentales se concluye que la producción de permeado respecto a la presión de alimentación es de tipo lineal con un coeficiente de correlación lineal de  $R^2=0.9874$ .

Además se observa que al aumentar la presión de alimentación de 39.1 a 77.2 PSI la producción de permeado experimenta un incremento de 2.33 a 24.5 l/min. Como se muestra en el gráfico de la Figura 41.

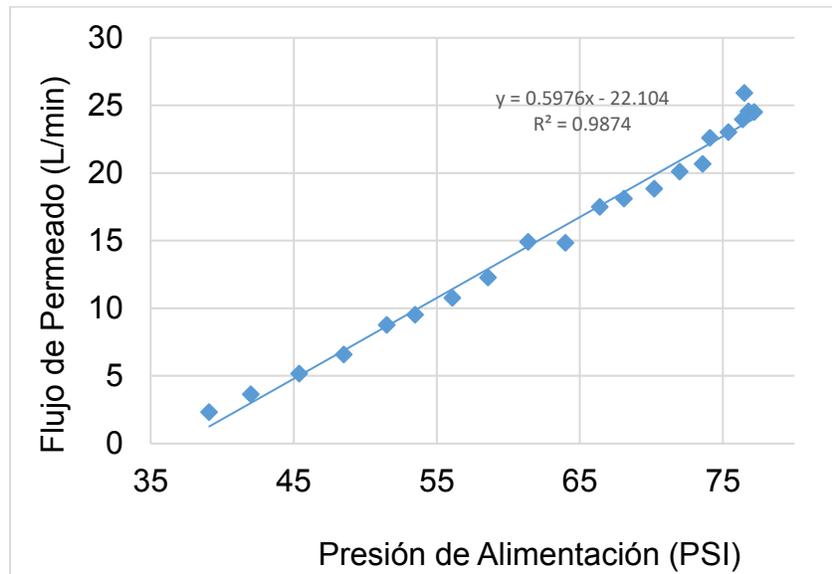


Figura 41. Dependencia en la producción de permeado respecto a la presión de alimentación.

## 4.3 Resultados Obtenidos en el Centro de Investigaciones En Óptica A.C. (CIO)

### 4.3.1 Calidad del Agua

Se evaluaron tres condiciones diferentes de calidad de agua, los valores nominales de las concentraciones de sales minerales en campo evaluadas fueron 689 mg/l, 1245 mg/l y 1510 mg/l. La tabla 15 muestra los resultados promedio en cada prueba, cabe mencionar que en la Ciudad de Aguascalientes los resultados sólo fueron tomados en campo.

Tabla 15. Resultados de la evaluación en campo de la calidad del agua en unidad CIO-Ags

No. Muestra	Muestra	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	SDT (mg/l)	Flujo (l/min)	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	Influente	1400	689		24
	Permeado	54.4	25.5	2	24.3
2	Influente	2460	1245		25.1
	Permeado	40	18.65	2	25.5
3	Influente	2960	1510		25
	Permeado	45	24.7	2	25.4

Las membranas de RO no evitan retener totalmente el flujo de las sales como por ejemplo los compuestos monovalentes presentes son capaces de atravesar a través de la membrana con diferentes tasas de transferencias en permeado y sal respectivamente. Esto tiene como consecuencia que el permeado y la sal que a bajas presiones la conductividad en el permeado sea ligeramente mayor y a presiones mayores la conductividad sea menor.

Los resultados muestran que para las condiciones experimentales usando la ecuación 10, la eficiencia de remoción fue de 96.11%, 98.37% y 98.48% para cada una de las muestras respectivamente.

#### *4.4 Comparación con la Norma Oficial Mexicana NOM-SSA1-127-1994*

De acuerdo con las especificaciones del sistema desalinizador, se requiere que el agua obtenida cumpla con no exceder los límites máximos permisibles por la NOM-SSA1-127-1994 modificada, ya que es la norma que, en el territorio Mexicano, regula el agua para uso y consumo humano y con esto comprobar si el permeado es apta o no para su consumo.

La tabla 16 presenta una comparación de los datos de cationes y aniones, alimentados al sistema desalinizador, los valores del permeado y los valores permitidos por la normatividad. Los valores fueron emitidos por el Laboratorio del IMTA. (Anexo C).

Tabla 16. Comparación de Influyente, Efluente y límites Máximos Permisibles obtenidos en el IMTA

Cationes Y Aniones	Límites Máximos Permisibles Por La Norma (mg/l)	Influyente (mg/l)	Efluente (mg/l)
<b>Bicarbonatos</b>	500	495	18
<b>Carbonatos</b>	500	<0.188	<0.188
<b>Sulfatos</b>	400	779	<4.0
<b>Calcio</b>	---	41.9	<0.1
<b>Sodio</b>	200	455.6	5.562
<b>SDT</b>	1000	1514	14

Debido a que en el sistema desalinizador tiene como principal sensor la Conductividad Eléctrica (CE), la cual es medida en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y los parámetros de la norma se encuentran en  $\text{mg}/\text{l}$  y para poder homogeneizar las unidad se sigue un factor de conversión de 0.5 aproximadamente y así se podrá tomar la decisión si el agua es apta para consumo humano. Según los valores de CE para que se considere como agua potable el permeado debe tener un valor entre 100 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  como se muestra en la tabla 5.

En el caso del efluente obtenido a nivel laboratorio no se consideraría como agua apta para consumo humano ya que tiene una conductividad de 36  $\mu\text{S}/\text{cm}$  equivalente a una concentración de 18  $\text{mg}/\text{l}$  por lo tanto este permeado se tendría que remineralizar para que sea consumible. Para las pruebas realizadas en el CIO-Ags sólo se puede comparar la cantidad de SDT que permite la norma con los que se obtuvieron en cada muestra, como se presentan en la tabla 17.

Tabla 17. Comparación de Influyente, Efluente y límites Máximos Permisibles de SDT obtenidos en CIO-Ags

Parámetro	Límites Máximos Permisibles Por La Norma (mg/l)	Muestra	Influyente (mg/l)	Efluente (mg/l)
<b>SDT</b>	1000	1	689	25.5
		2	1245	18.65
		3	1510	24.7

Como puede observarse, el efluente obtenido en las instalaciones del CIO no se considera como agua apta para consumo humano ya que tiene una conductividad menor de 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  equivalente a una concentración de 25  $\text{mg}/\text{L}$  por lo que se recomienda que el permeado obtenido sea remineralizado para que sea consumible.

Se puede comparar el permeado del sistema desalinizador con agua embotellada vendida en el mercado y así tener una mejor referencia de lo que se está obteniendo como producto. Estos valores son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 18. Comparación de Agua embotellada comercial y agua obtenida del desalinizador

Parámetro	Límites Máximos Permisibles Por La Norma (mg/l)	Agua	Concentración (mg/l)
TDS	1000	Ciel	110
		Bonafont	164
		Dispensador CIO-Ags	19.64
		Sistema desalinizador	18.65

## 4.5 Evaluación Económica

Para la estimación de costos del sistema se replicó la metodología propuesta por Banat, F. & Jwaied 2008, en el cual se consideraron las capacidades de producción y las características del diseño para la obtención de un coste del sistema desalinizador. Las hipótesis económicas planteadas del estudio son las siguientes:

- El ciclo de vida de la planta es de 20 años.
- Los costos de explotación y mantenimiento se estiman en un 20% del pago anual de la planta [93]. Aproximadamente el 13% se relaciona con el mantenimiento. El sistema de servicio incluye el reemplazo de filtros de pre-tratamiento.
- La tasa anual de reemplazo de membrana es del 10% [93].
- 7% tasa de interés, cuando se requiere financiación.

La Tabla 19 enlista los componentes del sistema desalinizador y el costo de construcción total estimado para el sistema RO-PV. Los costos se basan en los precios de compra actuales. El sistema de desalinización solar tiene un costo relativamente elevado, comparado con un sistema de desalinización no solar [94].

El sistema de bombeo con paneles fotovoltaicos representa el 63% del costo de construcción total estimado.

Tabla 19. Componentes del Sistema RO-PV

Componente	Descripción	Costo base
Membrana con carcasa de acero inoxidable	2 membranas (RE-4040 BLN)	US \$800.00
Sistema de bombeo con sistema fotovoltaico	Sistema de Bombeo TECNO15-3/1115 con 2 módulos fotovoltaicos que producen 0.54 kW de energía Eléctrica. Un inversor de 1500 W, un regulador de carga y 2 baterías de gel.	US \$2084.73
Equipo de Monitoreo	Dos sensores de presión, un sensor de conductividad eléctrica, una electro válvula y un plc	US \$1818.47

<b>Filtro para Pre-tratamiento</b>	Un SBD-25-205 con una carcasa de plástico	US \$45
<b>Accesorios Hidráulicos</b>	Todos los Accesorios Hidráulicos en General	US \$100
<b>Instalaciones</b>	Instalación de Equipamiento	US \$800
<b>Costo Total</b>		<b>US \$5648.2</b>

Los gastos incididos después de la puesta en marcha del sistema y los gastos generados en la operación real, se nombran costos de operación anuales. Los costos siguientes importantes son los gastos de operación y mantenimiento (O & M), cambio de membranas y amortización o cargos fijos. Los cargos fijos sólo aplican cuando los fondos para realizar el proyecto necesitan ser proporcionados por un préstamo, y por ende, generar un interés [95].

En la tabla 20 se presentan resumidas las principales características para la estimación de costos.

Tabla 20. Características principales para la estimación de costos

<b>Costo de Capital (Cc)</b>	<b>US \$5648.2</b>
Costo del Módulo de Membrana (Mc)	US \$400
Capacidad (M)	0.5-1 m <sup>3</sup> /d
Disponibilidad de la planta (f)	90%
Taza de Interés	7.5%

En este trabajo se estimaron dos costos unitarios de agua permeada: con y sin amortización. El primero de ellos se basa en los costos totales de capital, el reemplazo de membranas y O & M, el segundo sólo cambia los costos totales de capital por los cargos fijos anuales.

El costo unitario del agua permeada (sin amortización) se puede calcular como la suma del costo total de capital, la sustitución de la membrana y los costos de O & M, divididos por la cantidad total de agua permeada producida (7,300m<sup>3</sup>) durante la vida útil del sistema de desalinización solar [95]. La siguiente tabla presenta el costo principal del producto en US/m<sup>3</sup>.

Tabla 21. Costo Unitario de Agua Permeado Sin Amortización

	<b>Costo (US\$/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Inversión Total de capital</b>	1.63-0.815
<b>Reemplazo de Membranas</b>	0.2-0.1
<b>O &amp; M costo anual</b>	0.32-0.16
<b>Costo del producto unitario</b>	2.15-1.075

El costo con amortización se estimó como:

$$a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} = \frac{0.075(1+0.075)^{20}}{(1+0.075)^{20} - 1} = 0.09809/\text{año} \quad (17)$$

Donde:

$a$  = Factor de Amortización

$n$  = Representa del ciclo de vida de la planta (20 años)

$i$  = Tasa de Interés 7.5% (2018 Banco de México, cambia cada año)

La Tabla 22 presenta el costo unitario del agua permeada con amortización.

Tabla 22. Estimación De Costo Unitario de Agua Permeada Con Amortización

Concepto	Calculo	Costo (US\$/m <sup>3</sup> )
<b>Cargos Fijos Anuales (US/año)</b>	$A_{fijo} = (a)(Cc)$	554.03
<b>Reemplazo de Membranas (US/año)</b>	$A_{reemplazo} = 0.1(Mc)$	40
<b>Costo anual de O &amp; M</b>	$A_{O \& M} = 0.2(A_{fijo})$	110.80
<b>Costo Anual Total</b>	$A_{total} = A_{fijo} + A_{reemplazo} + A_{O \& M}$	704.83
<b>Costo Unitario del Producto</b>	$A_{unitario} = \frac{A_{total}}{(f)(M)(365)}$	4.29-2.14

Los costos unitarios de los productos presentados en las Tablas 21 y 22 se estimaron según la capacidad de producción del sistema.

Cuando la concentración inicial de influente aumenta, la producción de permeado disminuye, por lo tanto, el incremento del costo es proporcional a la concentración de alimento. Respecto a la comparación de precios del agua, se debe señalar que el costo del agua depende en gran medida de las capacidades de la planta y de las características del influente. Se han estimado costos de 0,24 US\$/m<sup>3</sup> para una planta grande de agua salobre por RO y 0,47 US\$/m<sup>3</sup> para agua de mar desalinizada para riego [96].

Comparando los pequeños sistemas de desalinización PV-RO que muestran el costo de permeado y que son altos respecto al valor unitario obtenido, garantizan que el sistema es económicamente viable; la Tabla 22 presenta los costos entre diferentes sistemas PV-RO.

Tabla 23. Costos de Diferentes Sistemas PV-RO

País	Costo (US\$/m <sup>3</sup> )	Capacidad (m <sup>3</sup> /d)
<b>Grecia [97]</b>	9.55	0.35
<b>Emiratos Árabes Unidos [101]</b>	7.21	20
<b>Gran Canaria, España [100]</b>	16	1
<b>Brasil [99]</b>	9	4
<b>Kalimnos, Grecia [98]</b>	6.95	12

## *Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones*

### *5.1 Conclusiones*

Con base en los objetivos y metas planteadas al inicio de este proyecto, a continuación se describen las conclusiones más relevantes obtenidas en este proyecto de tesis de Maestría:

1.- Se cumplió con el objetivo principal de lograr diseñar y construir una planta prototipo de desalinización basada en el uso de membranas de osmosis inversa, equipada con paneles fotovoltaicos e instrumentados.

2.- Se probó el sistema usando un influente que excedió la norma, con esto se observó el comportamiento de la concentración del permeado. La calidad del agua que se obtuvo se ubica por debajo del límite permitido para consumo humano (18 mg/l). De hecho el proceso requiere de una etapa secundaria de remineralización para cumplir con la norma correspondiente.

3.- La presión máxima a la que se pueden operar el sistema es de 100 PSI. El sistema fue diseñado para que filtro de pre tratamiento presente fugas si la presión de 100 PSI es excedida.

4.- Se observó que el sistema inicia la producción de permeado de 2.33 l/min a 39.1 PSI, lo que es equivalente a una irradiación solar incidente de  $340 \text{ W/m}^2$  y 24.5 L/min a 77.2 PSI, que equivalen a  $735.2 \text{ W/m}^2$ . El proceso se vuelve poco eficiente para valores de la irradiación por debajo de  $400 \text{ W/m}^2$  es posible seguir produciendo permeado que cumple con la NOM-127-SSA1-1994.

5.- El porcentaje de remisión de sales minerales se encuentran entre un rango de 95-98%, lo cual ocasiona que el producto obtenido (permeado) se considere como agua desionizada y no es apta para consumo humano.

6.- El sistema desalinizador al estar conectado en corriente directa, presenta como variador de velocidad de la bomba la irradiancia ya que esta afecta directamente la potencia de la bomba. Operando el equipo en modo de corriente alterna, no importa la irradiancia ya que los paneles fotovoltaicos tienen como única función cargar de energía las baterías y el inversor se encarga de convertir los 24Vdc que generan el banco de baterías a 120Vac lo cual será suministrado a la bomba. Aunque implica un costo adicional el sistema con baterías permite maximizar la producción del agua ya que la energía para que funcione la bomba siempre está disponible

7.- La cantidad de permeado obtenido, operando el prototipo en corriente alterna en un lapso de 5 horas por día, sería de 600 l a  $1 \text{ m}^3$  aproximadamente excediendo lo

planteado en los objetivos, lo cual por un costo de US\$1.075 hace económicamente viable el prototipo, ya que las potabilizadoras que actualmente existente en mercado tienen un costo elevado y mayor consumo energético por cada m<sup>3</sup> producido.

## *5.2 Recomendaciones*

- 1.- Se recomienda realizar una buena instalación eléctrica que considera las protecciones necesarias mediante el uso de interruptores termomagnéticos y puesta a tierra del sistema fotovoltaico.
- 2.- Si se desea que el sistema desalinizador entregue mayor cantidad de permeado, se debe de colocar una válvula de estrangulamiento a la salida del rechazo con la única finalidad de elevar la presión en el interior de las membranas.
- 3.- Se recomienda que cada 6 meses aproximadamente se cambie el filtro de Microfiltración (MF) por uno nuevo ya que en esta etapa es la que tiene el mayor impacto en el tratamiento de desalinización.

## *Trabajo Futuro*

1.- Automatizar la planta prototipo colocando un PLC, una HMI, electroválvulas, sensores, lo que garantizaría una mejor caracterización y control del sistema desalinizador.

2.- Agregar la segunda etapa de la planta potabilizadora que consiste en un reactor fotocatalítico que tendrá la función de degradar algunos microorganismos que posiblemente lograron atravesar la membrana de RO. En esta etapa se colocaran más sensores para garantizar que el producto que se está obteniendo cumpla con todas las normas posibles y sea de calidad. Los sensores que se agregaran son: pH, flujómetro, refractómetro y oxígeno disuelto (DO).

## *Referencias*

- [1]. Gleick, P.H. 2002. The World's Water 2002-2003: The Biennial Report on Freshwater Resources. Island Press, Washington, D.C.
- [2]. Consejo Nacional de Población CONAPO, 2015.
- [3]. Comisión Nacional del Agua, CONAGUA, 2008
- [4].S. Perveen and L. A. James 2011. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability. Applied Geography, 31:321-328, 2011
- [5].Comisión Nacional del Agua. Atlas del agua en Mexico. 2015. URL, <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/SGP-36-12.pdf>.
- [6]. "Nuevas Energías Renovables: Una Alternativa Energética Sustentable para México (Análisis y Propuesta)". Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. México, 2004.
- [7]. "Energías Renovables para el Desarrollo Sustentable en México". Secretaria de Energía. México, 2006.
- [8]. Shatat M., Riffat S.B. 2012. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources, Int. J. Low-Carbon Tech.
- [9]. Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis JG, Marinas BJ, Mayes AM. 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. Nature
- [10]. Fritzmann C, Löwenberg J, Wintgens T, Melin T. 2007. State-of-the-art of reverse osmosis desalination. Desalination.
- [11]. Subramani A, Badruzzaman M, Oppenheimer J, Jacangelo JG. 2011. Energy minimization strategies and renewable energy utilization for desalination: a review.
- [12]. Al-Karaghoul A, Renne D, Kazmerski LL. Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions.
- [13]. Xia GH, Sun QX, Cao X, Wang JF, Yu YZ, Wang LS. 2014. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-powered transcritical CO<sub>2</sub> (carbon dioxide) power cycle for reverse osmosis desalination based on the recovery of cryogenic energy of LNG (liquefied natural gas).
- [14]. Antipova E, Boer D, Cabeza LF, Guill\_en-Gos\_albez G, Jim\_enez L. 2013. Uncovering relationships between environmental metrics in the multi-objective optimization of energy systems: a case study of a thermal solar Rankine reverse osmosis desalination plant.
- [15]. Blanco-Marigorta AM, Masi M, Manfrida G. 2014. Exergo-environmental analysis of a reverse osmosis desalination plant in Gran Canaria.
- [16]. Calise F, d'Accadia MD, Piacentino A. 2014. A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: dynamic simulation and economic assessment.
- [17]. El-Emam RS, Dincer I. 2014. Thermodynamic and thermoeconomic analyses of seawater reverse osmosis desalination plant with energy recovery.

- [18] Ghobeity A, Mitsos A. 2010 Optimal time-dependent operation of seawater reverse osmosis. Desalination.
- [19]. de Carvalho PCM, Riffel DB, Freire C, Montenegro FFD. 2004. The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant.
- [20]. Thomson M, Miranda MS, Infield D. 2003 A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency over a wide operating range.
- [21]. Thomson M, Infield D. 2003. A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries.
- [22]. Joyce A, Loureiro D, Rodrigues C, Castro S. 2001. Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places.
- [23]. Aybar HS, Akhatov JS, Avezova NR, Halimov 2010. AS. Solar powered RO desalination: investigations on pilot project of PV powered RO desalination system.
- [24]. Thomson, M.; Infield, D. 2003 A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. Desalination, 153(1–3): 1–8.
- [25]. Thomson, M.; Infield, D. 2005 Laboratory demonstration of a photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries. Desalination, 183(1–3): 105–111.
- [26]. Thomson, M.; Miranda, M.; Gwillim, J.; Rowbottom, A.; Draisey, I. 2001 Batteryless Photovoltaic Reverse Osmosis Desalination System; Dulas Ltd.: Machynlleth, UK, p 25.
- [27]. Thomson, M. 2003 Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics without Batteries; Loughborough University, UK, 2003; p 242.
- [28]. Joyce, A.; Loureiro, D.; Rodrigues, C.; Castro, S. 2001. Small reverse osmosis units using PV systems for water purification in rural places. Desalination, 137(1–3): 39–44.
- [29]. Mohamed, E. S.; Papadakis, G. 2004. Design, simulation and economic
- [30]. Mohamed, E. S.; Papadakis, G.; Mathioulakis, E.; Belessiotis, V. 2008. A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems: A technical and economical experimental comparative study. Desalination, 221(1–3): 17–22.
- [31]. Boesch, W. W. 1982. World's first solar powered reverse osmosis desalination plant. Desalination, 41(2): 233–237.
- [32]. Keeper, B. G.; Hembree, R. D.; Schrack, F. C. 1985. Optimized matching of solar photovoltaic power with reverse osmosis desalination. Desalination, 54(0): 89–103.
- [33]. APHA 1995. Standard Methods for the Examination for Water and Wastewater. USA: American Public Health Association, Washington, DC 20005, 19th Edition,
- [34]. Kiely G. 1999. Ingeniería ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión Madrid: Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S.A.U.
- [35]. Kemmer F., Mc Callion J. 1989. Manual del Agua: su naturaleza, tratamiento y aplicaciones (Tomo III). Nalco Chemical Company: McGraw-Hill.

- [36]. Rodríguez S. 2010. La dureza del agua. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza\\_agua.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf).
- [37]. Guerra F.J., Struck, A., Villalobos S.A. 2008. Practica 6: Ablandamiento por intercambio iónico. En: Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Disponible en: [http://fjartnmusic.com/Personal/8o\\_Semestre\\_files/LIAPreP6.pdf](http://fjartnmusic.com/Personal/8o_Semestre_files/LIAPreP6.pdf)
- [38]. Hernández A. 2014. Como influye el pH en salud humana. En: Powered by Blogger.. Disponible en: <http://phenserhumano.blogspot.mx>.
- [39]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2000. Guidebook on Introduction of Nuclear Desalination, Technical Reports Series No. 400, IAEA, Vienna
- [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1997. Thermodynamic and economic evaluation of co-production plants for electricity and potable water, IAEA-TECDOC-942, Vienna.
- [41] Dévora-Isordia, G.E., González Enríquez, R., Ruiz-Cruz, S. 2013. Evaluation of Desalination Processes and their Development in Mexico. Water Technology and Sciences, 4:3, 25-43.
- [42] M. Isaka. 2012. Water Desalination Using Renewable Energy. International Renewable Energy Agency and International Energy Agency.
- [43] M. Shatat, M. Worall, and S. Riffa. 2013. Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. Sustainable Cities and Society.
- [44] A. M. Delgado-Torres and L. Garcia-Rodriguez. 2007. Status of solar thermal-driven reverse osmosis desalination.
- [45] H. Sharon and K.S. Readdy. 2015 A review of solar energy driven desalination technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews.
- [46] N. Setoodeh, R. Rahimi, and A. Ameri. 2011. Modeling and determination of heat transfer coefficient in a basin solar still using CFD.
- [47] S. M. A. Moustafa, D. I. Jarrar, and H. I. El Mansy. 1985. Performance of a self regulating solar multistage flash desalination system.
- [48] T. Mezher, H. Fath, Z. Abbas, and A. Khaled. 2011. Techno-economic assessment and environmental impacts of desalination technologies.
- [49] M. A. Sharaf, A. S. Nafey, and L. Garcia-Rodriguez. 2011. Exergy and thermo-economic analyses of a combined solar organic cycle with multi effect distillation (MED) desalination process.
- [50] V. Ruiz-Mazon. 2001. La desalinización, una alternativa para el abastecimiento de agua en México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [51] M. A. Sharaf, A. S. Nafey, and L. Garcia-Rodriguez. 2011. Thermo-economic analysis of solar thermal power cycles assisted MED-VC (multi effect distillation-vapor compression) desalination processes.
- [52] O. Kuroda, S. Takahashia, K. Wakamatsub, S. Itohb, S. Kubotac, K. Kikuchic, Y. Eguchid, Y. Ikemagae, N. Sohmaf and K. Nishinoiring. 1987. An electrodialysis sea water desalination system powered by photovoltaic cells.
- [53] C. Charcosset. 2009. A review of membrane processes and renewable energies for desalination.

- [54] M. R. Qtaishat and F. Banat. 2013. Desalination by solar powered membrane distillation systems.
- [55] R. W. Barker. 2004. Membrane Technology and Applications. John Wiley and Sons, Ltd, Mnelo Park, CA, second edition.
- [56] A. Fick. 1985. Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie, 1985.
- [57] Mercé Raventós, Sonia Duarte, 2007. Tecnología de membranas. Universidad Politécnica de Cataluña
- [58] Mahaut, M. 1992. Aplicaciones de la ósmosis inversa, ultrafiltración y microfiltración en la industria láctea. Revista Argentina de Lactología 6(6): 19- 44.
- [59] Fariñas, M. 1999. Ósmosis inversa. Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones". España, McGraw-Hill.
- [60] Saavedra Aldo, Romero Julio, 2007. Aspectos generales sobre procesos y tecnologías de membranas. Curso electivo de procesos de membranas. Departamento de Ingeniería Química. Universidad de Santiago de Chile.
- [61] García Olmos Carlos Francisco, 2002. Aplicación de la ósmosis inversa y la nanofiltración en el acondicionamiento de aguas para calderas. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo.
- [62] Bourgeois K. N., Darby J. L. y Tchobanoglous G., 2001. Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness Water Research vol. 35 No. 1, pp. 77-90.
- [63] Pilutti Michael B, Julio, 2002. Desarrollo de un módulo industrial. Boletín Informativo El Manantial. Número 15. Editado por el Centro Canario del Agua
- [64] Ali, M. T.; Fath, H. E. S.; Armstrong, P. R. 2011. A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(8): 4187–4199.
- [65] Effendi, Y. 1988. Three years experiences for PVRO-desalination. In Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twentieth IEEE, 1988; pp 1194–1199, vol. 1192.
- [66] Hasnain, S. M.; Alajlan, S. A. 1998. Coupling of PV-powered RO brackish water desalination plant with solar stills. Desalination, 116(1): 57–64.
- [67] Abdallah, S.; Abu-Hilal, M.; Mohsen, M. S. 2005. Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions. Desalination, 183(1-3): 95–104.
- [68] Clarke, D. P.; Al-Abdeli, Y. M.; Kothapalli, G. 2013. The effects of including intricacies in the modelling of a small-scale solar-PV reverse osmosis desalination system. Desalination, 311(0): 127–136.
- [69] Soric, A.; Cesaro, R.; Perez, P.; Guiol, E.; Moulin, P. 2012. Eausmose project desalination by reverse osmosis and batteryless solar energy: Design for a 1 m<sup>3</sup> per day delivery. Desalination, 301(0): 67–74.
- [70] Richards, L. A.; Richards, B. S.; Schäfer, A. I. 2011. Renewable energy powered membrane technology: Salt and inorganic contaminant removal by nanofiltration/reverse osmosis. Journal of Membrane Science, 369(1–2): 188–195.
- [71] Richards, B. S.; Capão, D. P. S.; Schäfer, A. I. 2008. Renewable energy powered membrane technology. 2. The effect of energy fluctuations on performance of a photovoltaic hybrid membrane system. Environmental Science & Technology, 42(12): 4563–4569.

- [72] Richards, B. S.; Masson, L.; Schäfer, A. I. 2009. Impact of feedwater salinity on energy requirements of a small-scale membrane filtration system; Yanful, E., ed.; In *Appropriate Technologies for Environmental Protection in the Developing World*; Springer: The Netherlands.
- [73] Al Malki, A.; Al Amri, M.; Al Jabri, H. 1998. Experimental study of using renewable energy in the rural areas of Oman. *Renewable Energy*, 14(1–4): 319–324.
- [74]. Al Suleimani, Z.; Nair, V. R. 2000. Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman. *Applied Energy*, 65(1–4): 367–380.
- [75]. de Carvalho, P. C. M.; Riffel, D. B.; Freire, C.; Montenegro, F. F. D. 2004. The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(5): 373–385.
- [76]. Ahmad, G. E.; Schmid, J. 2002. Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems. *Energy Conversion and Management*, 43(18): 2641–2649.
- [77]. Hrayshat, E. S. 2008. Brackish water desalination by a stand alone reverse osmosis desalination unit powered by photovoltaic solar energy. *Renewable Energy*, 33(8): 1784–1790.
- [78]. Mahmoud, M. M. 2003. Solar electric powered reverse osmosis water desalination system for the rural village, Al Maleh: Design and simulation. *International Journal of Sustainable Energy*, 23(1-2): 51–62.
- [79] Faten Hosney, F.; Ninet Mohamed, A.; Hanaa Mohamed, F. 2012. Optimization of renewable energy power system for small scale brackish reverse osmosis desalination unit and a tourism motel in Egypt. *Smart Grid and Renewable Energy*, 03: 43–43.
- [80]. Richards, B. S.; Schäfer, A. I. 2003. Photovoltaic-powered desalination system for remote Australian communities.
- [81]. Schäfer; Broeckmann, A.; Richards 2006. Renewable energy powered membrane technology. 1. Development and characterization of a photovoltaic hybrid membrane system. *Environmental Science & Technology*, 41(3): 998–1003.
- [82]. Cherif, H.; Belhadj, J. 2011. Large-scale time evaluation for energy estimation of stand-alone hybrid photovoltaic–wind system feeding a reverse osmosis desalination unit. *Energy*, 36(10): 6058–6067.
- [83]. Khayet, M.; Essalhi, M.; Armenta-Déu, C.; Cojocar, C.; Hilal, N. 2010. Optimization of solar-powered reverse osmosis desalination pilot plant using response surface methodology. *Desalination*, 261(3): 284–292.
- [84]. Riffel, D. B.; Carvalho, P. C. M. 2009. Small-scale photovoltaic-powered reverse osmosis plant without batteries: Design and simulation. *Desalination*, 247(1–3): 378–389.
- [85]. Schäfer, A. I.; Richards, B. S. 2005. Testing of a hybrid membrane system for groundwater desalination in an Australian national park. *Desalination*, 183(1–3): 55–62.
- [86]. Banat, F.; Qiblawey, H.; Al-Nasser, Q. 2012. Design and operation of small-scale photovoltaic-driven reverse osmosis (PV-RO) desalination plant for water supply in rural areas. *Computational Water, Energy, and Environmental Engineering*, 1(3): 31–36.

- [87]. Bouguecha, S.; Hamrouni, B.; Dhahbi, M. 2005. Small scale desalination pilots powered by renewable energy sources: Case studies. *Desalination*, 183(1–3): 151–165.
- [88]. Dallas, S.; Sumiyoshi, N.; Kirk, J.; Mathew, K.; Wilmot, N. 2009. Efficiency analysis of the Solarflow: An innovative solar-powered desalination unit for treating brackish water. *Renewable Energy*, 34(2): 397–400.
- [89]. Cheah, S.-F. 2004. Photovoltaic Reverse Osmosis Desalination System. In Bureau of Reclamation, Denver Federal Center, Denver, Colorado; p 30.
- [90]. Masson, L.; Richards, B. S.; Schäfer, A. I. 2005. System design and performance testing of a hybrid membrane-photovoltaic desalination system. *Desalination*, 179(1–3): 51–59.
- [91]. Richards, L. A.; Richards, B. S.; Schäfer, A. I. 2011. Renewable energy powered membrane technology: Salt and inorganic contaminant removal by nanofiltration/reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*, 369(1–2): 188–195.
- [92]. Banat, F. & Jwaied, N. 2008. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. *Desalination* 220 (1–3), 566–573.
- [93]. Dessouky, H. & Ettouney, H. 2002. *Fundamentals of Salt-water Desalination*. Elsevier, Amsterdam.
- [94]. Kreith, F. & Kreider, J. F. 1978. *Principles of Solar Engineering*. McGraw Hill, New York.
- [95]. Banat, F. & Jwaied, N. 2008. Economic evaluation of desalination by small-scale autonomous solar-powered membrane distillation units. *Desalination* 220 (1–3), 566–573.
- [96]. Zarzo, D., Campos, E. & Terrero, P. 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalination and Water Treatment* 51 (1–3), 53–66.
- [97]. Mohamed, E. S., Papadakis, G., Mathioulakis, E. & Belessiotis, V. 2008. A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems – a technical and economical experimental comparative study. *Desalination* 221 (1–3), 17–22.
- [98]. Amati, V., Zapater, C. H., Sciubba, E. & Marcuello, J. U. 2008. Process simulation of a reverse osmosis desalination plant powered by photovoltaic panels for Kalymnos Island. *ASME Conference Proceedings* 8 (1), 209–217.
- [99]. Carvalho, P. C. M., Riffel, D. B., Freire, C. & Montenegro, F. F. D. 2004. The Brazilian experience with a photovoltaic powered reverse osmosis plant. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 12 (5), 373–385.
- [100]. Herold, D., Horstmann, V., Neskakis, A., Plettner-Marliani, J., Piernavieja, G. & Calero, R. 1998. Small scale photovoltaic desalination for rural water supply-demonstration plant in Gran Canaria. *Renewable Energy* 14 (1–4), 293–298.
- [101]. Helal, A. M., Al-Malek, S. A. & Al-Katheeri, E. S. 2008. Economic feasibility of alternative designs of a PV–RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates. *Desalination* 221 (1–3), 1–16.
- [102] Daniel Czekaj 1988.. *Aplicaciones de la Ingeniería: 3. Maquinaria hidráulica en embarcaciones pesqueras pequeñas*, pag. 96



# Anexos

## Anexo A

### Interfaz de ROSA

Al ejecutar el programa ROSA, se abrirá automáticamente una ventana con el aspecto que se muestra en la figura 43:

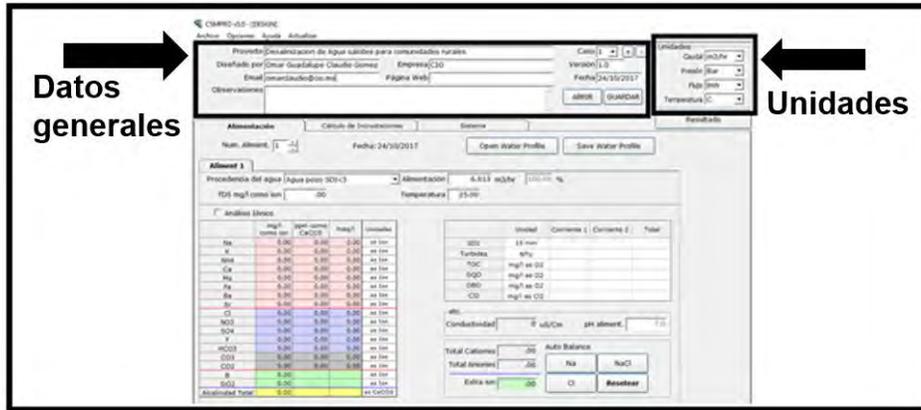


Figura 42. Ventana inicial de ROSA: Pestaña de “Información De Proyecto”

En la parte superior de la pantalla de inicio que presenta ROSA, se debe ingresar los datos del proyecto y el nombre de quien está ejecutando el programa y en la parte superior derecha se encuentran las unidades en las que se desea que se arrojen los resultados.

Existen 2 maneras de ingresar los valores de alimentación, la primer manera es ingresar solo un valor final de los TDS que contiene la muestra así como se muestra en la siguiente figura.

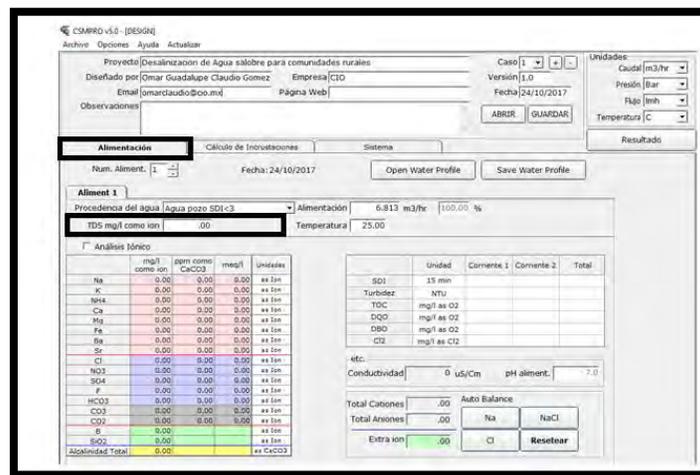


Figura 43. Alimentación de Datos agregando TDS totales de la muestra

La segunda manera de ingresar la alimentación es cuando se tiene un estudio de calidad del agua o de la muestra, donde se desglosa individualmente la cantidad de cada anión o catión presente. (Figura 45).

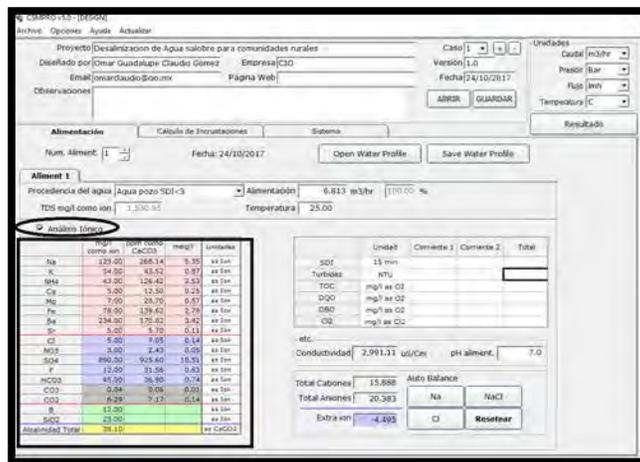


Figura 44. Alimentación detallada de aniones y cationes presentes

Cuando se ingresan los datos del proyecto y los datos de alimentación de la muestra se procede a seleccionar la configuración del sistema el cual consiste en número de tubos y cantidad de membranas por tubo, así como también la selección de la membrana.

La nomenclatura que ROSA presenta en las membranas consiste en el diámetro, longitud y si es de nanofiltración u ósmosis inversa como se presenta en la siguiente figura:



Figura 45. Nomenclatura de Membranas en ROSA

La selección de la membrana depende del lugar que es tomada la muestra y de la calidad de la misma. ROSA clasifica las membranas como se observa en la tabla 24:

- RE= Osmosis Inversa**
- NE= Nanofiltracion**

Tabla 24. Clasificación de membranas en ROSA

<b>Membranas para agua salobre (BWM)</b>	
<b>BE</b>	Uso general: agua de río, lago, pozo y residual
<b>BN</b>	
<b>Membranas resistentes al ensuciamiento (FRM)</b>	
<b>FE</b>	Tratamiento de aguas residuales
<b>FN</b>	Cero descargas (ZD)
<b>FL</b>	Caudal de permeado constante
<b>Membranas de baja presión (LPM)</b>	
<b>BL</b>	Capacidades similares a las BWM
<b>BLF</b>	Efectivas para ahorrar costos
<b>BLR</b>	Alto rechazo de sal a bajas presiones
<b>TL</b>	
<b>Membranas para agua de mar (SWM)</b>	
<b>SR</b>	Pueden tratar alta salinidad (10 000 ppm)
<b>SN</b>	Alta rechazo de sal (desalinización)
<b>SH</b>	Efectivas para áreas remotas
<b>Membranas para agua de grifo (TWM)</b>	
<b>TE</b>	Agua potable y segura para beber
<b>TL</b>	Red municipal
<b>Membranas para agua ultrapura (UPWM)</b>	
<b>UE</b>	Alto rechazo, baja extracción
<b>HUE</b>	Bajo tiempo de enjuague del Carbono Orgánico Total (COT/TOC)
<b>UL</b>	Agua de enjuague para semiconductores / agua para LCD

Para seleccionar la membrana en ROSA se selecciona la pestaña “sistema” y posteriormente “selección del modelo” como se muestra en la siguiente figura:

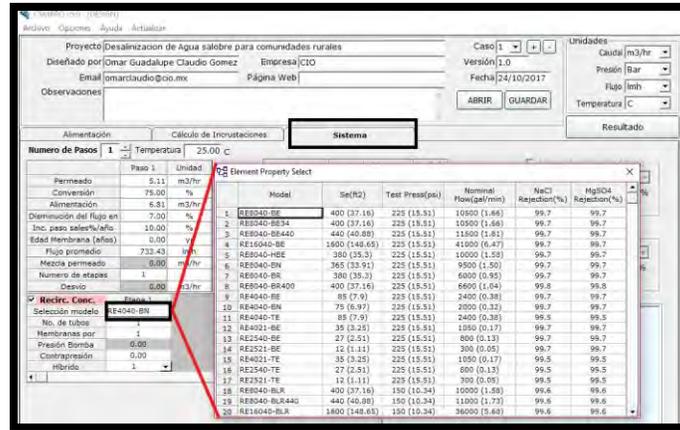


Figura 46. Selección de la membrana

Para terminar con la simulación en ROSA se seleccionan el número de tubos y la cantidad de membranas por tubo. (Figura 48).

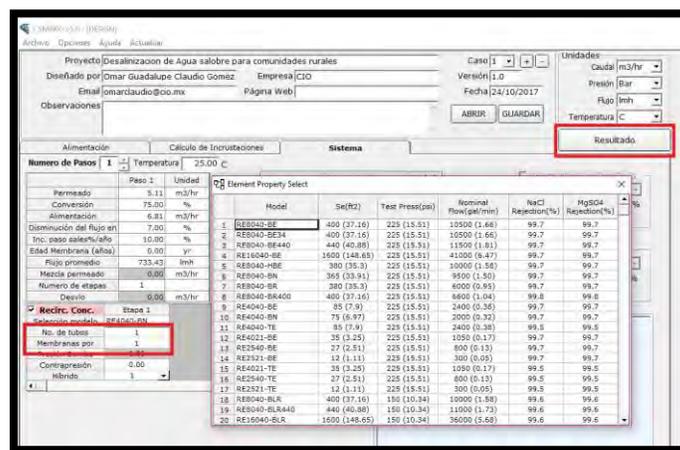


Figura 47. Selección de No. de Tubos y Membranas por tubo

Al terminar de seleccionar el número de tubos y cantidad de membranas por tubos, sólo resta obtener los resultados de la simulación. Los resultados se despliegan en 3 pestañas: Resultados, Diagrama y Coste. La figura 49 muestra resultados de una simulación ya previamente realizada.

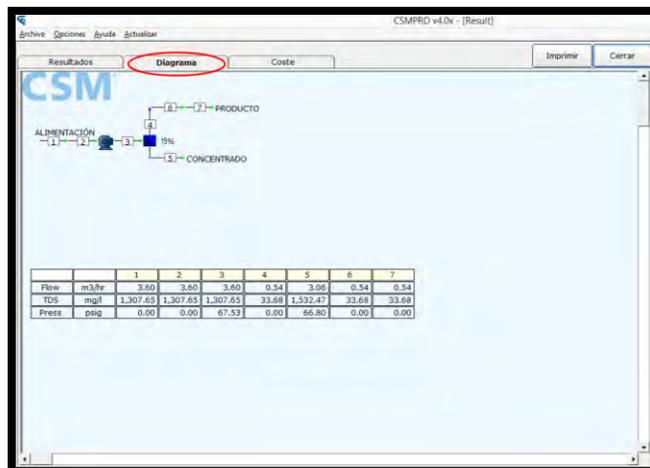


Figura 48. Diagrama de Resultados en simulación de ROSA

La pestaña de “Resultados” es la más importante de las 3 ya que en esta se desglosan detalladamente cada dato de la simulación para los requerimientos alimentados al inicio y es muy importante que no se despliegue ningún error o advertencia para que no se presente problemas futuros y si se llegó a presentar algún error se recomienda cambiar de membrana. (Figura 50)

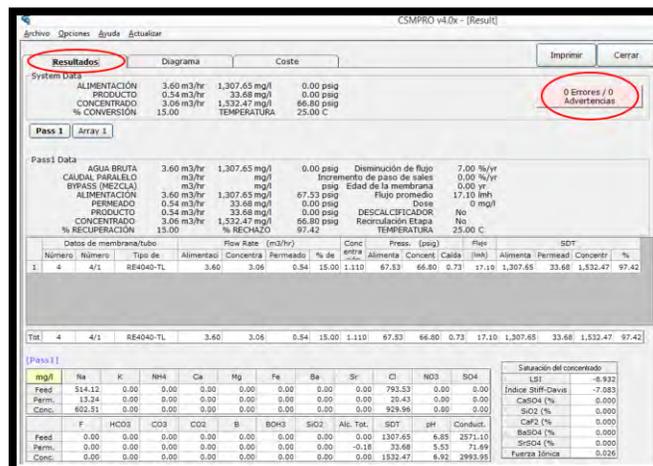


Figura 49. Resultados Finales en ROSA

## Anexo B

# FICHA TECNICA DE LAS MEMBRANAS SELECCIONADAS

### RE4040-BLN

Membrana de OI para Baja Presión  
con área extendida para Agua Salobre

#### ESPECIFICACIONES

Características Generales	Rango de flujo de permeado	2,600 GPD (9.8 m <sup>3</sup> /da)
	Porcentaje nominal de rechazo de sales	99.20%
	Área efectiva de membrana	85 Ft <sup>2</sup> (7.9 m <sup>2</sup> )

1.- Las condiciones del permeado están basadas en datos tomados después de 30 min. de operación en las siguientes condiciones de prueba

- Una solución de 1,500 mg/l de NaCl a 150 psig (1.0 MPa) de presión aplicada
- 15% de recuperación
- 77 °F ( 25 °C )
- pH 6.5 - 7.0

2.- 99.0% Mínimo de rechazo de sales

3.- El rango del flujo de permeado puede variar pero no será más del 10% de los valores que se presentan

4.- Todos los elementos están sellados al vacío en bolsas de polietileno, con una solución al 1.0% SBS (bistrufto de sodio) y empacadas individualmente en cajas de cartón

Tipo de Membrana	Comuesto de película delgada
Material de la Membrana	Poliimida (PAI)
Configuración de la Membrana	Esiral con cubierta de FRP

#### Dimensiones

Modelo	A	B	C	D	E
RE4040-BLN	40.0 pulg. (1,016mm)	4.0 pulg. (102 mm)	0.75 pulg. (19.1 mm)	1.61 pulg. (41 mm)	1.61 pulg. (41 mm)



- 1.- Cada membrana viene con un sello U (rechazo) , un interconector (copie) y dos O-ring
- 2.- Todos los modelos RE4040 encajan en los recipientes de presión de 4" pulg. (102 mm)

La información proporcionada en este documento es únicamente para propósitos informativos. Es responsabilidad del usuario de asegurar el uso apropiado de este producto. Woongjin no asume ninguna obligación, responsabilidad o daños incurridos para el mal uso del producto o para la información proporcionada en este documento. Este documento no expresa o implica ninguna garantía en cuanto a la comerciabilidad o la buena forma física del producto.

Woongjin Chemical Co., Ltd.

Para mayor información de nuestros productos contacta a un distribuidor de CSM, o visítanos en la página [www.csmmembranes.com.mx](http://www.csmmembranes.com.mx)  
Página 1 de 2

CSM Membranes de Mexico S.A. de C.V.

Batallón de San Patricio 111 Despacho 502  
Col. Residencial San Agustín, San Pedro NL.

ph. (52)81.8368.0001 [ventas@csmmembranes.com.mx](mailto:ventas@csmmembranes.com.mx)

## RE4040-BLN

Membrana de OI para Baja Presión  
con área extendida para Agua Salobre



### DATOS DE APLICACIÓN

Limites de operación	Max. Caída de Presión / Membrana	15 psi (1.1 MPa)
	Max. Caída de Presión / 240" de Recipientes de Presión	60 psi (0.41 MPa)
	Max. Presión de Operación	600 psi (4.14 MPa)
	Max. Flujo de Alimentación	18 gpm (4.09 m <sup>3</sup> /hr)
	Mín. Flujo de Rechazo	4 gpm (0.91 m <sup>3</sup> /hr)
	Max. Temperatura de Operación	113 °F (45° C)
	Rango de pH de Operación	2.0 - 11.0
	Rango de pH de Limpieza	1.0 - 13.0
	Max. Turbidez	1.0 NTU
	Max. SDI ( 15 min )	5.0
	Max. Concentración de Cloro	< 0.1 mg/l

Guía de Diseño para Diferentes Suministros de Agua		
Agua Negra Convencional (SDI <5)		8 - 12 <i>afd</i>
Agua Negra con Pre tratamiento por UF/MF (SDI<3)		10 - 14 <i>afd</i>
Agua de Mar de Toma abierta (SDI<5)		7 - 10 <i>afd</i>
Agua de Mar de Pozo Playero (SDI<3)		8 - 12 <i>afd</i>
Agua Superficial (SDI<5)		12 - 16 <i>afd</i>
Agua Superficial (SDI<3)		13 - 17 <i>afd</i>
Agua de Pozo (SDI<3)		13 - 17 <i>afd</i>
Permeado de OI (SDI<1)		21 - 30 <i>afd</i>

Limites de Saturación Usando Antiescalante		
Índice de Saturación de Langlier (LSI)		<+1.5
Índice de Saturación de Stiff and Davis (SDSI)		<+0.5
CaSO <sub>4</sub>		230% Saturación
SrSO <sub>4</sub>		800% Saturación
BaSO <sub>4</sub>		6000% Saturación
SiO <sub>2</sub>		100% Saturación

Los límites de saturación mencionados son típicamente aceptados por fabricantes de antiescalante patentados. Es responsabilidad del usuario de asegurar que las sustancia (s) químicas apropiadas y la concentración son dosificados antes del sistema de membranas para prevenir la formación de incrustaciones en la superficie de la membrana. Las membranas ensuciadas o dañadas debido a incrustaciones no son cubiertas por la garantía limitada.

Las membranas contenidas en las cajas debe ser almacenado en seco en la temperatura de cuarto (7-32°C; 40-95°F) y no deberá ser almacenado en la luz del sol directa. Si el bolso de polietileno es dañado, una nueva solución preservativa (bisulfito de sodio) debe ser añadida y sellado herméticamente para prevenir el crecimiento bacteriológico.

El permeado a partir de la primera hora de la operación deberá ser desechado para eliminar la solución preservativa.

Las membranas deberán ser sumergido en una solución preservativa durante almacenaje, transporte y cierre de sistema para prevenir el crecimiento biológico y la congelación. La solución de almacenaje estándar contiene el 1 % de bisulfito de sodio (grado alimenticio). Para el almacenaje a corto plazo (es decir una semana o menos) el 1 % de bisulfito de sodio es adecuado para prevenir el crecimiento biológico.

Mantener las membranas húmedas siempre después de iniciar la humidificación.

Evitar la presión excesiva y períodos de flujo.

Sólo usar productos químicos compatibles con las membranas y componentes. El uso de tales productos químicos puede invalidar la garantía limitada de las membranas.

La presión del permeado siempre debe ser igual o menor que la presión de alimentación/concentrado. El daño causado por contra presión invalida la garantía limitada del elemento.

Woongjin Chemical Co., Ltd.

Para mayor información de nuestros productos contacta a un distribuidor de CSM, o visitanos en la página [www.csmmembranes.com.mx](http://www.csmmembranes.com.mx).  
Página 2 de 2

CSM Membranes de Mexico S.A. de C.V.

Batallón de San Patricio 111 Despacho 502  
Col. Residencial San Agustín, San Pedro N.L.

ph. (52)81.8368.0001 [ventas@csmmembranes.com.mx](mailto:ventas@csmmembranes.com.mx)

## Anexo C

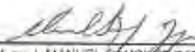
### RESULTADOS DEL LABORATORIO IMTA SOBRE LA CALIDAD DE AGUA OBTENIDA.

No.		DESCRIPCIÓN	Ca mg/L	Na mg/L	PARÁMETROS	
1		ALIMENTACIÓN	41.9	455.6		
2		PERMEADO	< 0.1	5.562		

**FECHA DE ANÁLISIS:** 2017/12/13-15    2017/12/13-18

**OBSERVACIONES:**  
 LAS MUESTRAS FUERON COLECTADAS POR EL CLIENTE. POR LO QUE EL LABORATORIO NO SE HACE RESPONSABLE DEL ORIGEN DE LAS MISMAS.  
 CON ATENCIÓN A:  
 CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.

ESTE REPORTE NO PODRÁ SER ALTERADO NI REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO. LOS RESULTADOS EMITIDOS SOLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS EN ESTE LABORATORIO.

  
 M en I. MANUEL SÁNCHEZ ZARZA  
 RESPONSABLE DEL ÁREA

Edición:	D	M	A	Sustituye a:	D	M	A	Revisión:	Hoja
	30	03	2017		11	02	2014	11	1 de 2

FMLC06-B

**LABORATORIO DE CALIDAD DEL AGUA****363****RESULTADOS**

<b>ÁREA:</b> QUÍMICA ANALÍTICA FÍSICOQUÍMICOS					
<b>CLIENTE Y/O PROYECTO:</b> DESALINIZACIÓN DE AGUA SUBTERRÁNEA SALOBRE MEDIANTE ENERGÍA SOLAR PARA APLICACIÓN DE RIEGO AGRÍCOLA EN ZONA RURAL.					
<b>DOMICILIO:</b> Paseo Cuauhnáhuac, No. 8832, Col. Progreso, Jaltepec, Mor.					
<b>No. DE CONTROL:</b> 363/2017		<b>TIPO DE MUESTRA:</b> AGUA SALOBRE		<b>FECHA DE MUESTREO:</b> 2017/12/06 <b>FECHA DE RECEPCIÓN:</b> 2017/12/07	
No	DESCRIPCIÓN	PARÁMETROS			
		BICARBONATOS mg/L	CARBONATOS mg/L	IÓN SULFATO mg/L	SDT mg/L
1	ALIMENTACIÓN	495	<0,188	779	1514
2	PERMEADO	18,0	<0,188	<4,00	14,0
<b>FECHA DE ANÁLISIS:</b>		2017/12/07	2017/12/07	2017/12/21	2017/12/08-11
<b>OBSERVACIONES:</b> LAS MUESTRAS FUERON COLECTADAS POR EL CLIENTE, POR LO QUE EL LABORATORIO NO SE HACE RESPONSABLE DEL ORIGEN DE LAS MISMAS. <b>CON ATENCIÓN A:</b> CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICAS A.C.					

ESTE REPORTE NO PODRÁ SER ALTERADO NI REPRODUCIDO PARCIAL O TOTALMENTE SIN LA AUTORIZACIÓN POR ESCRITO DEL LABORATORIO.  
 LOS RESULTADOS EMITIDOS SÓLO AMPARAN LAS MUESTRAS RECIBIDAS EN ESTE LABORATORIO.


 M en I MINERÍA SÁNCHEZ GUZMÁN  
 RESPONSABLE DEL ÁREA

Edici3n:	D	M	A	Sustituye a:	D	M	A	Revisi3n:	Hoja	1	de	2
	30	03	2017		11	02	2014	11				

FMUCOR-B