



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

# Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación  
y Desarrollo Tecnológico

## Tesis de Maestría

Modelado de un sistema de nanofiltración solar

presentada por  
**Ing. Mauricio Almonte Lemus**

como requisito para la obtención del grado de  
**Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica**

Director de tesis  
**Dr. José Jassón Flores Prieto**

Cuernavaca, Morelos, México. Julio de 2020.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los “modelos de vida”, mis papás Alejandro Almonte Lemus y Ma. De la Luz Araceli Lemus Suarez, que me motivaron, me guiaron y me apoyaron incondicionalmente a mi formación personal y profesional.

A mis compañeros de niñez, mis hermanos Luis Alejandro Almonte Lemus, Juan Pablo Almonte Lemus, por su cariño y cuidados al más pequeño.

A mi compañera de vida Samantha Moya Mondragón que con su amor y apoyo me motivaron a mejorar y ser mejor día con día.

A mis consejeros de profesión, mis padrinos Víctor Ulises Salcedo Arreygue y Martha Roció Bucio Lemus, quienes siempre cuento con su apoyo en la necesidad.

Al guía y director de este trabajo de investigación el Dr. José Jassón Flores Prieto, por su tiempo, dirección, paciencia y tolerancia que fueron esenciales para la conclusión de este grado de estudios.

A mis revisores de Tesis la Dra. Sara Lilia Moya Acosta, el Dr. Efraín Simá Moo y el Dr. Ulises Dehesa Carrasco por su paciencia, tiempo y dedicación que ofrecen para enseñar e instruir.

A todos los profesores y personal del TecNM/CENIDET, por su enorme disposición a enseñarnos guiarnos y apoyarnos en lo que sea necesario para nuestra formación, y conclusión del proyecto.

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), por proporcionar las herramientas e información para hacer posible este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico para hacer realidad este proyecto.

A mis amigos por su apoyo y motivación quienes siempre creyeron en mí.

Y por último a todas las personas que me guiaron y dejaron parte de su ser en mí, que pueden o no estar presentes, pero se encuentran en mi mente y corazón.

**¡GRACIAS A TODOS!**

# Índice

Lista de Figuras .....	III
Lista de Tablas.....	V
Nomenclatura .....	VI
Resumen .....	VIII
Capítulo 1 Introducción.....	1
<b>1.1. Motivación .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Revisión bibliográfica.....</b>	<b>7</b>
1.2.1. Modelación energética en la desalinización .....	7
1.2.2. Modelación de especies en desalinización.....	10
1.2.3. Modelación hidráulica fotovoltaica .....	13
1.2.4. Tratamiento de agua con nanofiltración .....	14
1.2.5. Modelado de generación fotovoltaica .....	17
1.2.6. Comparación del desempeño con otros sistemas de desalinización .....	18
1.2.7. Análisis económico .....	20
1.2.8. Conclusiones de la revisión bibliográfica.....	22
<b>1.3. Objetivos y alcances .....</b>	<b>24</b>
1.3.1. Objetivo general.....	24
1.3.2. Objetivos específicos .....	24
1.3.3. Alcances .....	24
<b>1.4. Estructura de tesis .....</b>	<b>25</b>
Capítulo 2 Fundamentos, Muestra y Metodología.....	26
<b>2.1. Fundamentos teóricos .....</b>	<b>26</b>
2.1.1. Evaluación del recurso solar y recurso fotovoltaico.....	26
2.1.2. Nanofiltración .....	30
2.1.3. Clasificación de cuencas.....	33
<b>2.2. Muestra (Lugar de estudio y calidad del agua).....</b>	<b>33</b>
2.2.1. Localización y clima (Recurso solar) .....	33
2.2.2. Manuel Doblado .....	37
2.2.3. Sistema de nanofiltración solar .....	38
<b>2.3. Modelos .....</b>	<b>40</b>
2.3.1. Modelo fotovoltaico.....	41
2.3.2. Modelo hidráulico .....	43
2.3.3. Modelo de especies.....	45
2.3.4. Modelo económico.....	46
<b>2.4. Optimización de sistemas de nanofiltración fotovoltaica. ....</b>	<b>48</b>
Capítulo 3 Plataforma de simulación .....	50
<b>3.1. Construcción de plataforma de simulación.....</b>	<b>50</b>
3.1.1. Irradiación y Potencia Fotovoltaica .....	51
3.1.2. Potencia hidráulica, caudal y presión de bombeo hidráulico .....	53
3.1.3. Separación de especies .....	54
3.1.4. Indicadores financieros .....	55
<b>3.2. Verificación de plataforma.....</b>	<b>56</b>

Capítulo 4	Resultados.....	59
4.1.	Resultados simulación energética.....	59
4.2.	Resultados de la simulación económica .....	62
4.3.	Optimización del sistema .....	64
Capítulo 5	Conclusiones y recomendaciones .....	66
5.1.	Conclusiones.....	66
5.2.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	67
Referencias	.....	68

# Lista de Figuras

Figura 1.1 Recurso hídrico mundial. [1].....	1
Figura 1.2 Escasez física de agua 2010, [2] .....	2
Figura 1.3 Clasificación de los procesos de desalinización modificado. [3].....	3
Figura 1.4 Radiación global horizontal mundial. [11].....	5
Figura 1.5 Distribución de agua por usos agrupados. [13].....	6
Figura 2.1 Composición celda fotovoltaica. [45] .....	28
Figura 2.2 Circuito representativo del módulo fotovoltaico.....	28
Figura 2.3 Representación del proceso de la nanofiltración.....	30
Figura 2.4 Tipos de cuencas hidrológicas de México .....	34
Figura 2.5 Distribución de cuencas endorreicas disponibles, con SDT medidos en campo	34
Figura 2.6 Distritos de riego .....	35
Figura 2.7 Distritos de riego Ubicación geográfica de las posibles zonas de estudio.....	36
Figura 2.8 Ubicación geográfica de las posibles zonas de estudio.....	36
Figura 2.9 Ubicación de Manuel Doblado.....	38
Figura 2.10 Sistema de nanofiltración solar .....	39
Figura 2.11 Acoplamiento de modelos.....	41
Figura 2.12 Metodología de Gherbi para modelo hidráulico .....	45
Figura 2.133 Metodología de optimización.....	49
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la estrategia de simulación del sistema de nanofiltración.	51
Figura 3.2 Diagrama de flujo de la plataforma de captación solar. ....	52
Figura 3.3 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación del sistema fotovoltaico. ....	53
Figura 3.4 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación hidráulica. ....	54
Figura 3.5 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación de la separación.....	55
Figura 3.6 Diagrama de flujo de los indicadores financieros. ....	56
Figura 3.7 Metodología de validación .....	57
Figura 4.1 Producción energética a) promedio mensual, b) totalizada. ....	60
Figura 4.2 Volumen de suministro, permeado y rechazo. ....	61
Figura 4.3 Costos del agua en Manuel Doblado.....	63

Figura 4.4 Punto de equilibrio operativo en tarifa industrial.....	63
Figura 4.5 Análisis variacional del área de captación .....	64
Figura 4.6 Análisis variacional de presión de suministro.....	65

# Lista de Tablas

Tabla 1.1 Comparativo de sistemas de desalinización solar .....	4
Tabla 2.1 Utilización de la tierra y salinidad de los pozos de riego cercanos .....	35
Tabla 2.2 Recurso solar de las zonas potenciales de estudio.....	37
Tabla 2.3 Parámetros característicos de módulo fotovoltaico.....	42
Tabla 3.1 Verificación de la plataforma de simulación.....	58
Tabla 4.1 Parámetros de la nanofiltración fotovoltaica.....	62

# Nomenclatura

## ELECTRICIDAD

Sigla	Descripción	Unidad
$V_T$	<i>Voltaje térmico ó potencia térmica</i>	$V$
$T$	<i>Temperatura en condiciones de clima actual</i>	$K$
$T_n$	<i>Temperatura nominal</i>	$K$
$G$	<i>Irradiación en la superficie del dispositivo</i>	$\frac{W}{m^2}$
$G_n$	<i>Irradiación nominal</i>	$\frac{W}{m^2}$
$N_s$	<i>Número de celdas en serie</i>	—
$K$	<i>Constante de Boltzman = <math>1.3806503 \times 10^{23}</math></i>	$\frac{J}{K}$
$V_{pv}$	<i>Tensión suministrado por el módulo</i>	$V$
$V_{mppt}$	<i>Tensión del punto maximo de potencia</i>	$V$
$V_o$	<i>Tensión requerido para pasar sobre los módulos</i>	$V$
$V_{arm}$	<i>Tensión de alimentación a la armadura</i>	$V$
$V_\omega$	<i>Tensión de suministro a la velocidad angular</i>	$V$
$K_I$	<i>Constante de fabricación o factor ideal</i>	—
$R_s$	<i>Resistencia de celdas en serie</i>	$\Omega$
$R_{sh}$	<i>Resistencia de celdas en paralelo</i>	$\Omega$
$R_{arm}$	<i>Resistencia de la armadura</i>	$\Omega$
$I_{pv}$	<i>Corriente generada por el módulo</i>	$A$
$I_{sh}$	<i>Corriente disipada por las celdas</i>	$A$
$I_o$	<i>Corriente disipada por el módulo</i>	$A$
$I_{ph,n}$	<i>Corriente generada por el módulo en condicion nominal</i>	$A$
$I_{mppt}$	<i>Corriente del punto maximo de potencia</i>	$A$
$I_{sat}$	<i>Corriente inversa de saturación del diodo</i>	$A$
$q_e$	<i>Carga del electrón = <math>1.60217646 \times 10^{19}</math></i>	$C$
$W_{ph_{mppt}}$	<i>Potencia fotovoltaica del punto maximo de potencia</i>	$W$

## HIDRÁULICA

Sigla	Descripción	Unidad
$k_{p\omega}$	<i>Contante de voltaje-desplazamiento angular de la bomba</i>	$\frac{V}{rpm}$
$k_{\eta}$	<i>Constante de desempeño del motor</i>	–
$\omega$	<i>Velocidad angular</i>	rpm
$Q_s$	<i>Caudal suministrado por la bomba</i>	$\frac{m^3}{s}$
$P_s$	<i>Presión de salida</i>	Pa

## ÓSMOSIS Y NANOFILTRACIÓN

Sigla	Descripción	Unidad
$\Psi_h$	<i>Potencial hídrico</i>	Pa
$\Psi_o$	<i>Potencial osmótico</i>	Pa
$\Psi_m$	<i>Potencial matricio</i>	Pa
$\Psi_g$	Potencial gravitatorio	Pa
$\Psi_p$	<i>Potencial de presión</i>	Pa

## ACRÓNIMOS

Sigla	Descripción
<b>RO</b>	Ósmosis inversa
<b>WWDR</b>	Informe Mundial de las naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos
<b>SDT</b>	Sólidos disueltos totales
<b>CONAGUA</b>	Comisión Nacional del Agua
<b>FV</b>	Fotovoltaico
<b>BP</b>	Baja presión
<b>NF</b>	Nanofiltración
<b>MPPT</b>	Seguimiento de punto máximo de potencia

# Resumen

En este trabajo se presenta un modelo energético de un sistema de desalinización por nanofiltración fotovoltaica que trabaja a baja presión (NF-FV-BP), basado en la primera ley de la termodinámica y análisis por componentes. El modelo se desarrolló construyendo un programa de simulación con análisis de componentes de acuerdo a la norma EN-12977. Las variables de entrada son las condiciones climáticas y la calidad del agua del caso de estudio. Las variables de salida son; el consumo energético, el permeado, la calidad del permeado la razón de permeado y el costo nivelado. La simulación se realizó acoplando cuatro modelos: el modelo de Pérez, el modelo de los cinco parámetros, el modelo de Gherbi y el modelo de concentración-polarización. La viabilidad del sistema se determinó a través de parámetros financieros, tasa interna de retorno, plazo de recuperación y costos nivelados. La simulación se validó comparando lo determinado por la simulación y los datos experimentales reportados en la cuenca de Río Verde, otorgando un error cuadrado porcentual promedio de 3.13%. La simulación se desarrolló en Manuel Doblado, otorgando el consumo energético, el permeado, la calidad del permeado, la razón de permeado y el costo nivelado de  $1.66 \text{ kWh/m}^3$ ,  $3.18 \text{ m}^3\text{-día}$ ,  $1375.14 \text{ mg/l}$ ,  $4/9$  y  $35.77 \text{ MXN/m}^3$  respectivamente. Los resultados del modelo se encontraron dentro de los rangos reportados en la literatura y de acuerdo a lo que se esperaría en la zona de análisis. La simulación permitió determinar las características de los componentes y optimizar el sistema en términos de consumo energético, razón de permeado, permeado, tasa interna de retorno y plazo de recuperación, a partir del área de captación y presión de suministro. La simulación permitió determinar la viabilidad económica para tarifa industrial y energética dentro de lo establecido en la literatura.

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1. Motivación

El agua es un recurso esencial para la vida en el planeta, tan fundamental que el 71% de la superficie del planeta es agua. El agua del planeta se divide en agua salada y agua dulce. El agua salada representa el 97.50%, mientras que, el agua dulce representa el 2.50%. El agua dulce disponible para el ser humano es de 0.75%, el resto se encuentra contenido en glaciares, hielo y nieve [1], dicha distribución se presenta en la Figura 1.1. De lo anterior, se determina que el recurso disponible para el ser humano es pequeña comparada con el agua salada disponible.

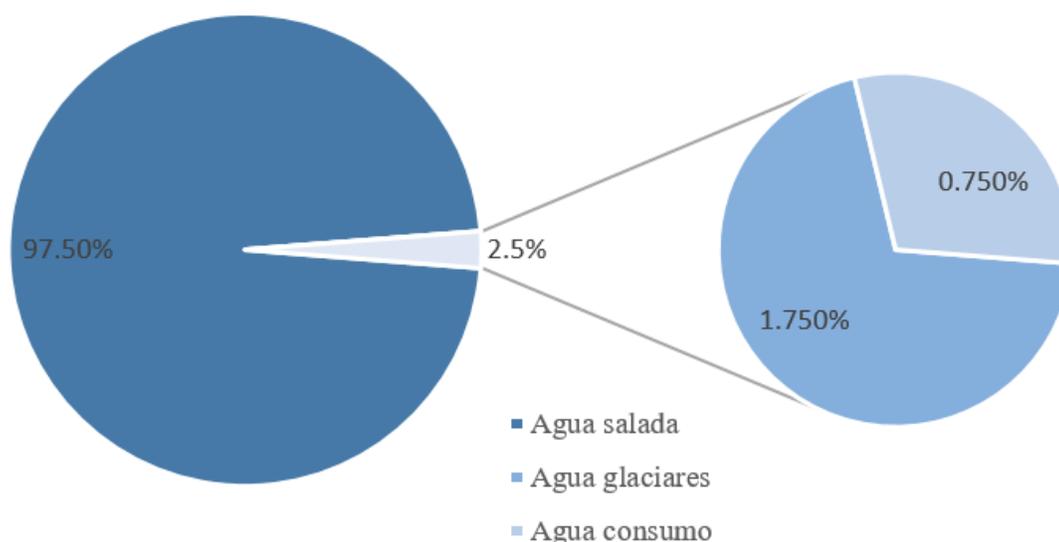


Figura 1.1 Recurso hídrico mundial. [1]

La demanda de agua a nivel mundial aumenta en función del crecimiento de la población, el desarrollo económico y los patrones de consumo cambiantes, entre otros factores. Actualmente, la demanda mundial de agua se ha estimado en alrededor de 4,600 km<sup>3</sup>/año, previendo aumentos entre 20% y 30% para 2050. La escasez del agua ya es crítica en varios países, como se aprecia en la Figura 1.2. El estado de escases se determina mediante el indicador del agua renovable per cápita de un país, que es la cantidad del recurso hídrico renovable entre el número de habitantes. Debido a que la población y los recursos están



distribuidos irregularmente, dificultando la disponibilidad del agua provocando la escasez.

[2]

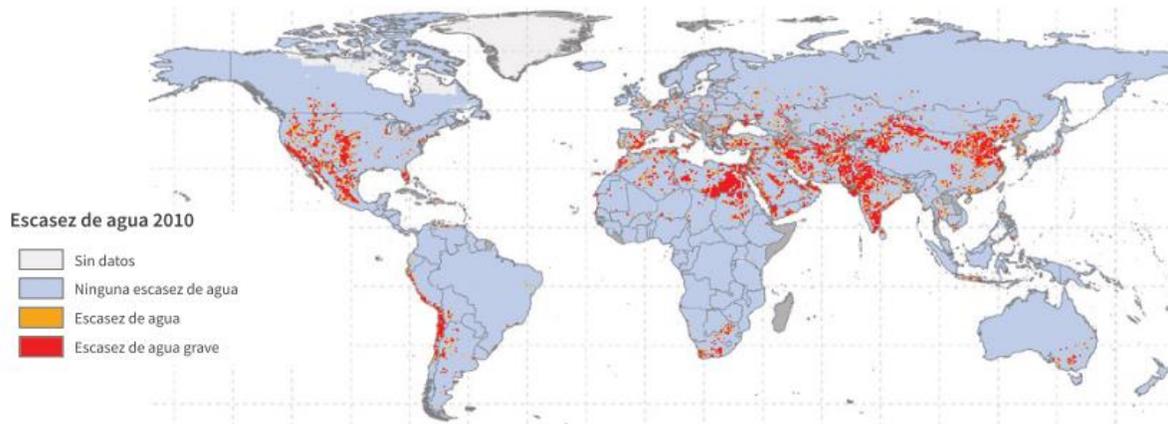


Figura 1.2 Escasez física de agua 2010, [2]

La demanda de agua dulce entre los usuarios se encuentra en aumento en varias regiones del mundo provocando escases de agua. Actualmente, el agua dulce no puede atender plenamente el abastecimiento de agua para las actividades agrícolas y energéticas. A nivel mundial, la demanda de agua para la producción agrícola y energética, prevé un incremento de 60% y 80% respectivamente, para antes del 2025. Debido a esto, la disponibilidad de agua se convirtió en tema de interés para el desarrollo tecnológico, que permita abastecer la demanda del recurso hídrico. [2]

Las tecnologías de desalinización nacen como una alternativa para abastecer la demanda de agua dulce. Las tecnologías más empleadas son; Destilación directa (DD), Chimenea Solar (CHS), Humidificación-deshumidificación (H-D), Multi Fases Flash (MSF), Desalinización Multiefecto (MED), Compresión de vapor (VC), Desalinización por congelación (FD), Desalinización por absorción (AD), Desalinización por vacío Natural (DVN), Electrodiálisis (ED), Destilación por membrana (MD), Nanofiltración (NF), Osmosis (FO) y Osmosis inversa (RO). Las tecnologías de desalinización se pueden clasificar según su fuente de alimentación; térmicas o eléctricas [3]. En la Figura 1.3 se muestra la clasificación de los procesos de desalinización establecida de acuerdo a la fuente alimentación térmica o eléctrica. La fuente de alimentación térmica se subdivide en Térmica solar y Térmica

eléctrica. La sub-fuente térmica solar se sub divide en foto-térmica y foto-eléctrica. La fuente eléctrica y foto-eléctrica se clasifican según su empleo sin membrana o con membrana.

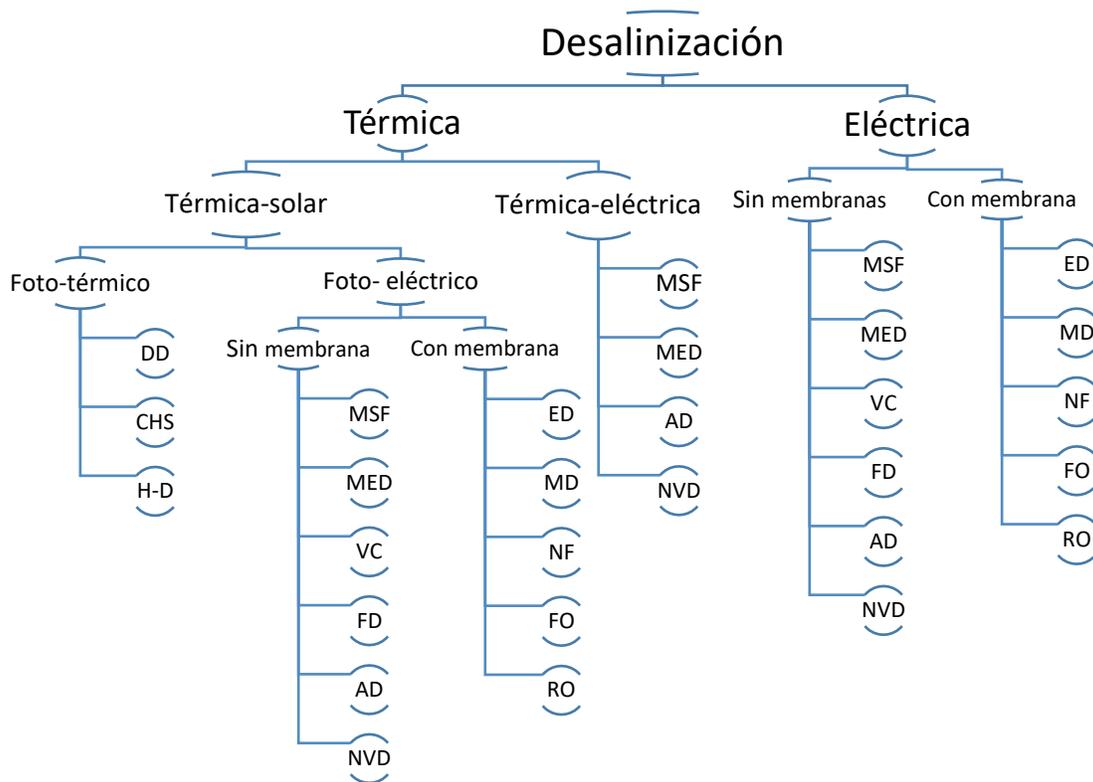


Figura 1.3 Clasificación de los procesos de desalinización modificado. [3]

En la actualidad en la escala mundial, la tecnología de ósmosis inversa y nanofiltración son las técnicas de desalinización más empleadas, debido a sus bajos costos energéticos y monetarios comparado con otras técnicas [4–7]. En la Tabla 1.1 se muestra un comparativo de los procesos de desalinización térmica-solar, donde se observa la capacidad de volumen de permeado del proceso, el consumo energético, la razón de permeado, la eficiencia de remoción y la razón de recuperación. Los procesos con membranas son los más destacados en termino de consumo energético. Sin embargo, de los procesos por separación mediante membranas como la osmosis inversa y la nanofiltración presentan la mayor capacidad de permeado con el menor consumo energético.

Tabla 1.1 Comparativo de sistemas de desalinización solar

Tecnología de desalinización	Capacidad permeada [m <sup>3</sup> /d]	Consumo energético [kWh/m <sup>3</sup> ]	Razón de permeado [PR]	Eficiencia [%]	Razón de recuperación [%]
<b>FOTO TÉRMICO</b>					
Destilación directa (DD)	<100	640	<1	30-40	N/A
Humidificación-deshumidificación (H-D)	1-100	31.1	0.5-2.75	40.58	N/A
Chimenea solar integrada (CHS)	96462-92616	N/A	N/A	53.35	N/A
<b>SIN MEMBRANA</b>					
Flash multietapas (MSF)	0.009-10	<144	0.7-0.9	N/A	0.6 -6
Destilación multiefecto (MED)	20-3000	50-195	9.3-10.7	N/A	6-38
Compresión de vapor (VC)	120	14-25	N/A	N/A	44
Desalinización por congelación (FD)	48-178	108.0	N/A	N/A	N/A
Desalinización por absorción (AD)	10	38.01-63.93	10.16-17.10	N/A	N/A
Desalinización natural por vacío (NVD)	13.9	416	1.42	N/A	N/A
Multiefecto con regeneración	3.24	N/A	2.35	N/A	N/A
Multietapas evacuado	0.534	N/A	N/A	53.9	N/A
<b>CON MEMBRANA</b>					
Electrodialisis (ED)	1-200	0.8-1.0	N/A	85	20-98
Destilación por membrana (MD)	>100	1.1-9050	0.5-8.1	N/A	3-5
Nanofiltración (NF)	>100	1.2-6	N/A	N/A	3-5
Ósmosis (FO)	24	1	N/A	N/A	N/A
Ósmosis inversa (RO)	<100	1.5-6.0	N/A	20-25	10-51

La ósmosis inversa es la tecnología más empleada para tratamiento de agua. Sin embargo, requiere de altas presiones de trabajo. Las altas presiones requeridas para el proceso, el requerimiento de personal y equipo especializado limitan su aplicación en zonas aisladas. Por estas condiciones, se ha desarrollado la nanofiltración como alternativa de prefiltrado [8], como sustituto de la Ósmosis inversa para algunos procesos [9] e irrigación [10], con el fin de reducir el requerimiento de alta presión y a su vez la robustez para su operación. El sistema de nanofiltración fotovoltaica a baja presión surge como una alternativa para implementarse en zonas remotas, debido a que regularmente se tiene una alta disponibilidad del recurso solar y un desabasto de agua.

El crecimiento poblacional genera escases de agua e incrementa la demanda energética, afectando directamente sobre el medio ambiente. Las afectaciones climáticas han provocado el desplazamiento de especies, fenómenos naturales, olas de calor y sequias. El ser humano en búsqueda de disminuir las afectaciones climáticas busca alternativas energéticas. La energía solar se muestra como una alternativa energética. En México el potencial del recurso solar oscila entre  $4.6 \text{ kW/m}^2$  a  $6.2 \text{ kW/m}^2$  considerándose arriba de la media a nivel mundial como se observa en la Figura 1.4.

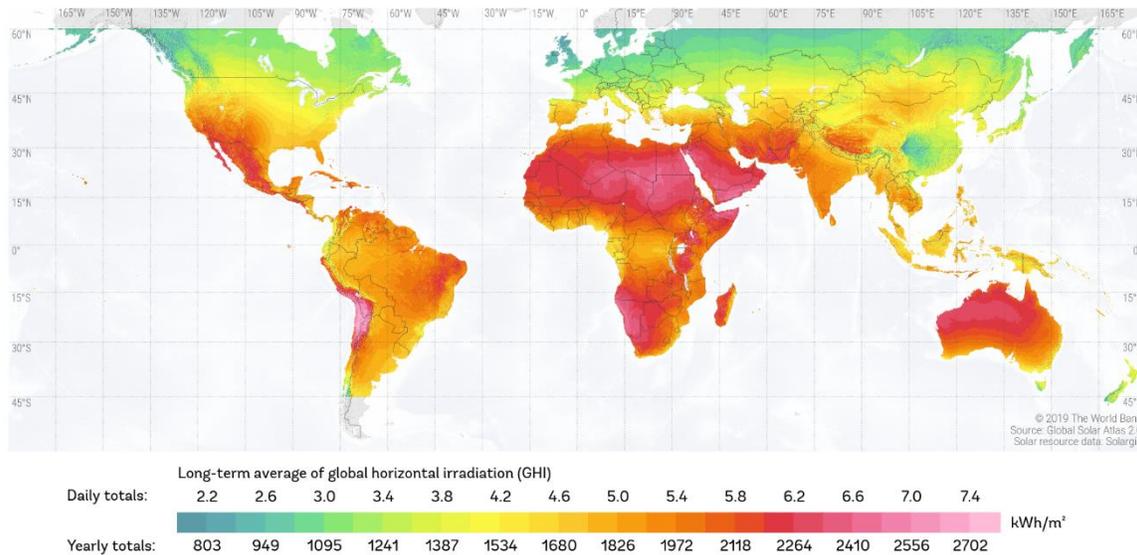


Figura 1.4 Radiación global horizontal mundial. [11]

En México la falta de límites bien definidos para explotación del recurso hídrico, con lleva a un mayor compromiso sobre las reservas de agua en todo el territorio. Las actividades humanas, ya sea para subsistir o producir e intercambiar bienes y servicios, han comprometido el agua a nivel nacional. La Comisión Nacional del Agua ha determinado que si el agua renovable per cápita alcanzara niveles cercanos o incluso inferiores a los  $1000 \text{ m}^3/\text{hab/año}$ , se califica como una condición de escasez [12]. Llevando a México a la búsqueda de alternativas para abastecer las necesidades del país.

El registro público de derechos de agua ha clasificado el uso del agua en México en agrícola, abastecimiento público, energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad distribuida e industria autoabastecida empleando el 76.3%, 14.6%, 4.8% y 4.3% respectivamente [12]. La Figura

1.5 muestra el uso del agua según la clasificación. Por lo que, el foco de interés para el abastecimiento de agua en el país es el agua para uso agrícola.

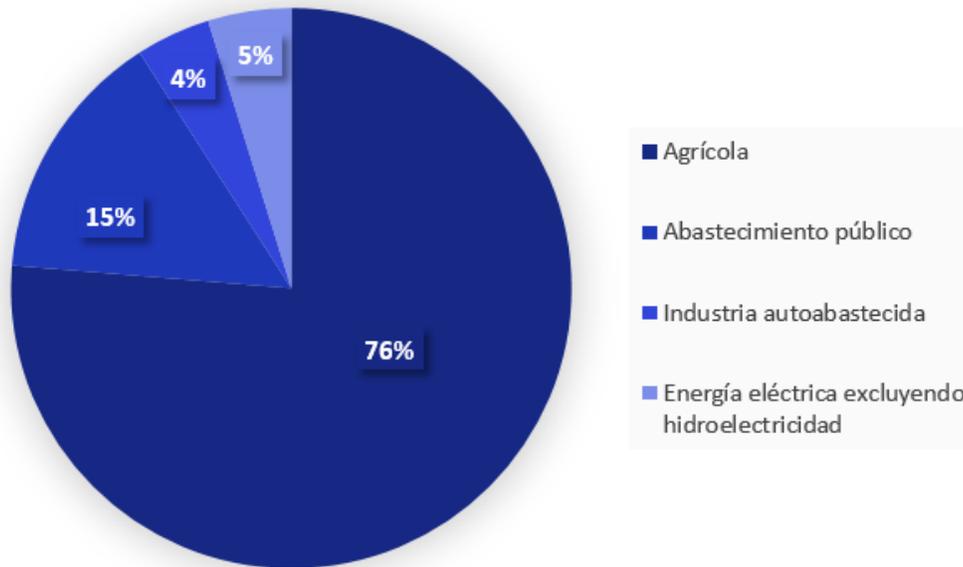


Figura 1.5 Distribución de agua por usos agrupados. [13]

Los suelos salitrosos representan 15% del territorio potencialmente productivo, que no es ocupado por la poca disponibilidad de agua para cultivo. La salinidad de estas tierras se debe a que están ubicadas en cuencas con drenaje ineficiente, donde en tiempo de lluvias se depositan sedimentos con sales debido a los escurrimientos y en la temporada de estiaje sólo se evapora el agua.[10] Las tierras salitrosas son zonas potenciales de cultivo, pero, se encuentran en zonas remotas donde la alimentación energética e hídrica no son posibles. La tecnología de nanofiltración se ostenta como una alternativa sustentable para el aprovechamiento del recurso hídrico en suelos potencialmente productivos. La aplicación de estos sistemas permite el desarrollo agrícola con aguas salitrosas, con alimentación energética de baja calidad, como lo es la energía solar fotovoltaica sin almacenamiento.

## 1.2. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica aporta una breve descripción sobre trabajos previos a este trabajo sobre: modelación energética para desalinización, modelación de especies en desalinización, modelación hidráulica fotovoltaica, tratamiento de agua con nanofiltración, modelado de generación fotovoltaica, comparativos de desempeño con otros sistemas de desalinización y análisis económicos.

### 1.2.1. Modelación energética en la desalinización

Riffel & Carvalho (2009) simularon, compararon y diseñaron un sistema de filtración de ósmosis inversa de pequeña escala, mediante módulos fotovoltaicos en dos configuraciones; con y sin inversor CD-AC. La simulación utilizó varios modelos matemáticos; el modelo “Circuito de un diodo”, el modelo “interruptor de potencia” y el modelo “difusión solución” a los cuales introdujo la irradiación total y la temperatura. Los resultados se comparados con resultados experimentales. El error obtenido entre los modelos y el experimento fue menor del 5 % para todos los parámetros de potencia fotovoltaica. El modelo con un inversor CD-AC requiere menos energía para el permeado. Observaron que el sistema de distribución en el inversor disminuye las pérdidas de energía [21].

Oh *et al.* (2009) simularon el desempeño energético y de desalinización de un sistema de ósmosis inversa para agua de mar. La simulación emplea el modelo de solución y difusión con concentración-polarización teórica. Los resultados demostraron que el consumo energético mínimo requerido para la planta de osmosis inversa para agua de mar (Sea Water Reverse Osmosis SWRO) era de 2.336 kWh/m<sup>3</sup>, con una capacidad de 1090 m<sup>3</sup>/día, y una recuperación del 51%, con un flujo promedio de flujo de 14 l/m<sup>2</sup>h a una temperatura óptima de 25°C. Los autores observaron que el consumo energético se incrementa a medida que se incrementa el flujo de alimentación, al igual que el rechazo de salmuera. Al incrementar la



temperatura del agua de alimentación, la energía específica se reduce al igual que la salmuera de rechazo [20].

Bilton *et al.* (2011) realizaron un estudio para comprobar la factibilidad de un sistema de Ósmosis Inversa (OI) fotovoltaico en zonas remotas. El estudio compara el desempeño de la OI fotovoltaica con la OI diésel. El modelado se realizó en Matlab/Simulink, basado en las ecuaciones de radiación directa incidente, el modelo de dos diodos, el modelo del motor estático, la bomba de Clark y el separador de flujo cruzado. El modelo experimental y el modelo en Matlab/Simulink resultaron con una diferencia promedio de 5.0%, con un consumo registrado experimental de 4.0 kWh/m<sup>3</sup> y 2.5 kWh/m<sup>3</sup>. Generando un costo promedio anual de \$ 17,265 USD y el sistema equivalente diésel un costo promedio anual de \$ 17,985 USD [7].

Franchini & Perdichizzi (2014) simularon un sistema de desalinización por humidificación-deshumidificación durante 72 h en verano, mediante TRNSYS. Los resultados fueron comparados en Matlab considerando dos configuraciones. La apertura de los colectores son 200 m y 150 m respectivamente para calentar a 90°C. El tanque de 3 y 2 m<sup>2</sup> con capacidad de enfriamiento de 50 y 30 kW respectivamente. El ángulo azimutal se consideró de 28° excediendo 100 W/m<sup>2</sup> de irradiación. En el estudio se observó que la temperatura demerita considerablemente el proceso y la producción del destilado. También, en el estudio se observó que a mayor temperatura se tiene un mayor requerimiento de calor para la producción, mientras que el COP disminuye. El desempeño del sistema es afectado considerablemente por la temperatura de ingreso del agua de mar, disminuye el desempeño del sistema humidificador-deshumidificador y del enfriador, requiriendo de mayor disipación de energía para destilar el agua [19].

Alshegri *et al.* (2015) diseñaron y realizaron un análisis de costo de una planta OI-FV para tratar agua de mar, en Abu Dhabi. El diseño consistía en tres fases; estimar el consumo y el costo del agua en el instituto, calcular la energía eléctrica necesaria y el costo para arrancar la planta, por último, estimar el área y el costo asociado a los colectores fotovoltaicos

requeridos para el sistema. El agua permeada requerida se consideró de  $200 \text{ m}^3/\text{día}$ . La simulación se realizó por medio los softwares ROSA para la separación de especies y RETScreen para análisis de costos. Con lo anterior, obtuvieron un consumo energético de  $6.99 \text{ kWh/m}^3$ . El periodo de recuperación de la inversión fue de 23.3 años, con una relación costo beneficio de 0.72. Los autores observaron que la fluctuación del suministro solar requiere ser acompañado con una alimentación de red eléctrica para reducir el tiempo de recuperación [18].

Alghoul *et al.* (2016) diseñaron y estudiaron el desempeño de un sistema de ósmosis inversa para agua de mar, de  $2 \text{ kW}$ , alimentado con energía fotovoltaica. El diseño del sistema consistió en limitar el suministro de energía a  $2 \text{ kWp}$  del sistema con la radiación  $4.2 \text{ kW/m}^2$ , utilizando el programa HOMER para el desempeño energético y ROSA para el desempeño de las membranas. El diseño se optimizó para agua con  $2000 \text{ mg/l}$  de STD, permeado  $50 \text{ mg/l}$ , consumo energético de  $1.1 \text{ kWh/m}^3$ , flujo de  $5.1 \text{ m}^3$  de agua fresca. El permeado se determinó con un error cuadrado de 0.985. Los resultados determinaron que se puede obtener un flujo estable de permeado y salinidad adecuada, de acuerdo a la zona y a la calidad del agua salobre de suministro [17].

Feng & Chen (2016) realizaron una conexión conceptual entre agua y energía en sistemas de tratamiento de agua residuales. La conexión se mide mediante la eficiencia de reducción de contaminantes y costo energético. La medición de la relación se realiza determinando la huella hídrica gris, dividido sobre la energía empleada para el tratamiento de agua. La relación permitió establecer un indicador de reducción de contaminantes en el agua. El indicador establece la cantidad de agua tratada por unidad de energía empleada, permitiendo identificar la capacidad de los sistemas de tratamiento de agua [16].

Voutchkov (2017) estudio configuraciones de plantas de OI, para destilación de agua de mar, en términos de la energía específica, sus tendencias y avances. El estudio comparó diferentes configuraciones plantas de OI en términos de la capacidad de permeado, de retención de SDT y energía específica. De las plantas estudiadas, el más favorable en términos de consumo

energético fue el proceso OI con recuperación con un consumo de energético de  $2.0 \text{ kWh/m}^3$  con una recuperación de 48% y un flujo de  $15.3 \text{ l/h}$ . El estudio demostró que los sistemas de OI son más eficientes cuando usan procesos de recuperación de energía [15].

Kirchem *et al.* (2020) realizaron un modelo de la respuesta a la demanda con modelos de proceso y sistemas energéticos, para aplicaciones de tratamiento de aguas residuales. El modelo se realizó a partir de modelos de respuesta a la demanda de procesos industriales y de energía. Los resultados mostraron que dependiendo de la adaptabilidad de producción pueden obtenerse ahorros económicos en un rango de -72.0% a +82.6%, proporcionando y tratando agua cuando el proceso lo solicite. Los sistemas con respuesta a la demanda optimizan los sistemas de energía flexible en ciertas condiciones de operación [14].

Los sistemas con respuesta a la demanda optimizan los sistemas de energía en ciertas condiciones de operación, deben considerarse la temperatura del agua de suministro, los inversores de energía, el suministro, con o sin recuperación de energía. La temperatura del agua de suministro al incrementar afecta la calidad del permeado aumentando la energía específica. Los inversores CD-AC requieren de menos energía disminuyendo las pérdidas de energía. El suministro de energía solar requiere ser acompañado con una alimentación de red eléctrica debido a las fluctuaciones, esto ayuda a reducir el plazo de recuperación de la inversión. Los sistemas de Osmosis Inversa son más eficientes cuando usan procesos de recuperación de energía. Las modelaciones energéticas han demostrado que los sistemas de separación por membrana presentan un consumo energético entre  $2.0\text{-}6.99 \text{ kWh/m}^3$ .

### **1.2.2. Modelación de especies en desalinización**

Wijimans & Baker (1995) realizaron un resumen del modelo de solución-difusión, sus bases, sus aplicaciones y su potencial. El modelo se fundamentó en las ecuaciones de la termodinámica básica, presión, temperatura, concentración y electro movimiento, complementando con la ley de Darcy y la ley de Ficks. El modelo de solución-difusión resultó ser adecuado para diálisis, ósmosis inversa, separación de gases, antes de la vaporación, pero no para ultrafiltración. El modelo otorga una descripción adecuada en el



comportamiento de membradas y de la dependencia del transporte de presión en las membranas, concentración y similares [27].

Geraldes & Brites Alves (2008) desarrollaron un programa de simulación de transporte de masa para membranas de nanofiltración para soluciones acuosas. El programa está basado en el modelo de Donnan poro esteárico participante y extrusión dieléctrica (DSPM&DE) discretizando el interior de la membrana usando el esquema de diferencias finitas. El simulador es parametrizado en base a las condiciones iniciales de potencial y perfiles de concentración, actualizando las condiciones parametrizadas mediante iteraciones. Las predicciones del programa para componentes multivalentes mostraron una desviación menor a 0.7% respecto al comportamiento de concentraciones de datos experimentales y a lo reportado en la literatura. El programa desarrollado recibió el nombre de NanoFiltran mostró ser una herramienta robusta para determinar el transporte de masa en sistemas multi-iónicos a detalle [26].

Geise *et al.* (2011) realizaron un estudio en un sistema de nanofiltración variando el material de cuatro tipos de membranas poliamidas. El estudio se realizó empleando las ecuaciones del modelo de Solución-difusión, la ley de Ficks, ley de Darcy, la concentración de agua en el polímero en baja y alta presión y el cambio de calidad del agua. El estudio demostró que el permeado de una solución es influenciado, por las características físicas de la membrana, la presión y la concentración de sales que se utilizan en el proceso. Las variables que influyen en el desempeño son; la permeabilidad, la difusividad, el espesor de la membrana y la solubilidad los cuales no son otorgados por los fabricantes, dificultando su simulación [25].

Fierro *et al.* (2012) realizaron un modelo de solución-difusión con imperfecciones para describir un permeado en la mezcla de solventes orgánicos para nanofiltración. El modelo empleo las teorías de Vrentas & Duda y Wesseling & Bollen del modelo de multidifusión. El modelo se desarrolló variando la presión de alimentación de 10 a 40 bar, permitiendo obtener el coeficiente de difusión de manera experimental. El coeficiente de difusión resultó notablemente importante para estimar el comportamiento promedio de la concentración en



el interior de las membranas. El modelo de Stefan-Maxwell presentó el mejor desempeño respecto al modelo de solución difusión con imperfecciones, ya que éste último requiere de experimentación para determinar el coeficiente de difusión de especies [24].

García-Martín *et al.* (2014) realizaron un método para determinar el tamaño de poro para la retención de solutos neutros en membranas de nanofiltración. El método se desarrolló empleando el modelo de flujo del poro esteárico, considerando los poros de la membrana cilíndricos uniformes y los solutos como moléculas esféricas. El residual del tamaño del poro para la nanofiltración fue de 0.02–0.01 *nm* respecto a la literatura. El modelo empleado otorgo una diferencia inferior de 0.3% respecto a datos experimentales y una desviación estándar de 10%. Los pequeños cambios en relación con el coeficiente de transferencia de masa, en este caso el tamaño del poro, produce importantes cambios en la cantidad de permeado [23].

Marchetti & Levingston (2015) compararon el desempeño de diferentes modelos de transporte de masa para nanofiltración con solventes orgánicos. Los modelos se compararon respecto a datos experimentales en términos de desempeño de regresión residual normal (RN) y el criterio de información de Akaike (CIA). Los modelos empleados para el estudio fueron: irreversibilidades termodinámicas con RN 5.92E-02 y una CIA -1.66e+01, solución difusión simple con RN 6.15E-02 y una CIA -1.83E+01, solución difusión clásica con RN 4.75E-02 y una CIA -2.04E+01, Stefan- Maxwell con 4.22E-02 y una CIA -1.53E+01, Flujo-Poro esteárico de Donnan con RN 5.91E-02 y una CIA -1.86E+01, Modificación Fuerza-Superficie Poro-Flujo con RN 5.96E-02 y una CIA -1.46E+01 y Solución difusión con imperfecciones con RN 5.92E-02 y una CIA -1.66E+01. El modelo de solución-difusión clásico resultó suficiente para obtener una descripción confiable para los procesos de simulación [22].

El modelo de Stefan-Maxwell presenta una descripción adecuada en el comportamiento de membranas. Actualmente, existen diversos programas que determinan la separación de especies como Nanofiltran, ROSA y WAVE. Estas herramientas están limitadas a ciertas

membranas por la variación de parámetros que no se encuentran con facilidad. Sin embargo, el modelo de solución-difusión otorga una diferencia con los datos experimentales de 0.3%, con una desviación estándar de 10%. Por lo que, el modelo de solución-difusión es suficiente para obtener una descripción confiable de los sistemas de nanofiltración con información clásica otorgada por el proveedor.

### 1.2.3. Modelación hidráulica fotovoltaica

Oi (2009) comparó diferentes controladores de carga para un sistema de bombeo fotovoltaico. El sistema simulado consiste de un módulo fotovoltaico de silicio policristalino de 150  $Wp$ , el controlador y una bomba de corriente directa con magnetos permanente. Los controladores de carga a analizar fueron el sistema de seguimiento de potencia máxima MPPT, el amplificador lineal de corriente (LCB, por sus siglas en inglés Linear Current Booster), y sin emplear controlador de carga. La simulación se realizó en MATLAB y SIMULINK. El flujo volumétrico máximo y las horas de uso fueron; 0.78  $m^3/h$ , 10  $h/día$  con LCB, 0.69  $m^3/h$ , 9.5  $h$  con MPPT y 0.66  $m^3/h$ , 6  $h$  acoplado directamente sin seguimiento. Sin embargo, los resultados mostraron que el sistema con MPPT es un sistemas más simple que el LCB mejorando el desempeño del sistema ofreciendo un 87% más de agua que el sistema sin el MPPT [30].

Carrillo *et al.* (2015) simularon un sistema de bombeo fotovoltaico a gran escala. La simulación emplea el modelo del diodo real y se bases de las leyes de afinidad de las bombas. El sistema consiste en un arreglo de módulos fotovoltaicos, un inversor con eficiencia del 100%, motor de corriente alterna. La simulación se efectúa con una alimentación de 20  $kWp$  con una carga estática de 250  $m$  operando 2613  $h-año$ . El flujo máximo fue de 12  $m^3/h$  es de 1637  $m^3/kWp$  con una razón de desempeño de 46% a partir de la radiación de referencia de 2517.4  $kWh/kWp$ , con un costo de 7.3  $c€/m^3$ . Al incrementar el tamaño del sistema el costo de bombeo disminuye, aun considerando los gastos de operación y mantenimiento [29].

Djoudi Gherbi *et al.* (2017) validaron el modelo de una motor-bomba fotovoltaico mediante un análisis de desempeño del sistema de bombeo. El modelo utilizó un ajuste de ecuaciones

empleando las curvas características. Las ecuaciones I-V y Q-V se ajustan empleando diferentes presiones de trabajo para cuatro bombas; dos centrifugas y dos de desplazamiento positivo. El ajuste empleó una matriz de ecuaciones en función al voltaje de alimentación, obteniendo una ecuación lineal para la I y cuadrática para el Q. Los resultados del modelo otorgaron un RMSE en un intervalo de 0.123-9.616% y el MAE de 0.116-9.838% respecto a la presión de suministro experimental. Los resultados más alejados del comportamiento experimental fueron las bombas centrifugas con un promedio de RMSE y MAE de 5.788% y 5.720% respectivamente, mientras que para las bombas de desplazamiento positivo fueron de 2.049% 2.077% respectivamente. El modelo predice el flujo para cualquier combinación de voltaje-corriente a cargas no mayores a los 65 m de columna de agua [28].

Los sistemas de bombeo fotovoltaico mejoran su desempeño en un 87% con seguidores de punto máximo de potencia (MPPT). El costo del sistema de bombeo disminuye al incrementar el tamaño del sistema. Los modelos son variados simulando el flujo a cualquier combinación de voltaje-corriente. El modelo a aplicar se adecua de acuerdo a la carga de trabajo. El modelo de Gherbi es el adecuado para un acoplamiento ya que simula el flujo a cualquier combinación de voltaje-corriente adecuándose a la carga.

#### **1.2.4. Tratamiento de agua con nanofiltración**

Pontalier *et al.* (1999) describieron el fenómeno de transferencia de masa con convección-difusión de flujo en los poros y en las membranas para nanofiltración. El fenómeno fue descrito a través de un modelo analizado en el sistema irreversible termodinámico y por el mecanismo de transporte generalizado de Nernst-Planck, calculando la difusividad y la convectividad-difusividad. El modelo se validó de manera experimental. En el estudio se encontró que, el modelo es aplicable únicamente para procesos de nanofiltración, y no es adecuado para ósmosis ni para ultrafiltración, haciendo un comparativo de la energía y el permeado instantáneo [34].

Wang *et al.* (2012) estudiaron la influencia del desempeño del proceso de nanofiltración a altas concentraciones (0.1-0.98 mol/L) en soluciones acuosas. El estudio se basó en revisar

fichas técnicas de membranas comerciales con respecto a la concentración en la frontera, y con el modelo de solución-difusión se obtuvieron constantes de desempeño de la membrana. Los resultados obtenidos tuvieron una correlación de  $R^2=0.98$  respecto a datos experimentales realizados con condiciones similares a los datos de entrada. Los autores determinaron que mediante la aplicación de la metodología aplicada en el estudio se obtienen la resistencia de permeado de la membrana durante el proceso [33].

D'Costa (2015) compararon en términos de permeado y rechazo de sulfatos la nanofiltración y la ósmosis inversa, para extracción de gas petróleo con inundación de agua. En el comparativo empleó muestras sintéticas de agua, de acuerdo a la norma ASTM D1141-52, a condiciones estándar de presión de 330.00 *psi*, un flujo cruzado de 3.0 *gpm*, a temperatura constante de  $25.00\pm 2^\circ\text{C}$ . La muestra se tomó con recuperación del 0.0% y 75.0%, en periodos de 20 horas y en otro de 10 días. Los resultados indicaron que la nanofiltración incrementa el flujo de permeado entre 20.0-30.0% respecto al ósmosis inversa, mientras que el rechazo de sulfatos fue de 0.20-0.50% de diferencia. La nanofiltración respecto a la osmosis inversa muestra ser una alternativa viable para remover sulfatos, ya que otorga un mayor desempeño en el permeado, en las mismas condiciones de operación [9].

Flores *et al.* (2015) realizaron un estudio experimental de un sistema de nanofiltración de baja presión con módulo fotovoltaico en San Luis Potosi. Determinaron la eficiencia de remoción de sulfatos y de sólidos totales disueltos, energía específica y productividad, con una insolación de 750-1000  $\text{W}/\text{m}^2$  bajo condiciones de laboratorio y campo con muestras controladas y de campo. Los sólidos totales disueltos se redujeron en promedio 75.15%, los  $\text{SO}_4^{-2}$  en 98.21% y los  $\text{Cl}^{-1}$  en 55.16%, con variación de 8.6%, y con un consumo energético de 1.30  $\text{kWh}/\text{m}^3$  con intervalos de 60 a 750  $\text{W}/\text{m}^2$ . Las fluctuaciones de la insolación de 60-1040  $\text{W}/\text{m}^2$  provocó cambios en la remoción de sólidos totales disueltos del 11.5%, entregando al menos 3.2  $\text{m}^3/\text{d}$  con 6.3 h-pico, con lo que se muestra que el sistema NF-FV-BP es una alternativa para potenciar la productividad agrícola [10].

Roy *et al.* (2017) realizaron un estudio del efecto de la temperatura en el transporte de iones en membranas de nanofiltración. El estudio se efectuó mediante el modelo de poro estérico de Donnan con exclusión dieléctrica, donde se observó el comportamiento de transporte; difusión, convección y electromigración a 22, 40 y 50 °C. Los parámetros que mayor afectan los sólidos totales disueltos en el rechazo son; el radio promedio del poro (22°C;0.58nm 40°C;0.59nm, 50°C;0.67nm), el espesor efectivo de la membrana del lado del soluto (22°C;0.98µm 40°C;0.46µm, 50°C;0.56µm) y el espesor efectivo de la membrana del lado permeado (22°C;2.20µm, 40°C;2.11 µm, 50°C;2.67 µm). Los iones que tienden a mostrar un mayor rechazo al intercambio, difieren del tamaño, la valencia, la difusividad y de los cambios característicos que sufra la membrana al subir la temperatura [32].

Labban *et al.* (2017) realizaron un modelo para nanofiltración a baja presión para estimar la calidad del permeado. La simulación emplea el modelo del poro Steric (estérico) de Donnan con exclusión dieléctrica usando una membrana comercial “Lb1.5C” a presión de 1 a 4 bar con sales experimentales de 1000 mg/kg NaCl. El modelo mostró una desviación promedio de 12% comparado los sólidos disueltos totales obtenidos con los resultados experimentales. El permeado aumenta cuando la mezcla tiene mayor peso molecular, ya que se incrementa la difusibilidad y el radio efectivo del poro. La NF a baja presión solo es posible debido a la habilidad de la membrana de retener iones fuera de la solución, cuando los iones monovalentes se encuentran pasando entre la membrana [8].

Abdel-Fatah (2018) describió los sistemas y aplicaciones de la nanofiltración. La descripción se efectuó a través de una recopilación bibliográfica resaltando las diferencias entre ósmosis inversa y ultrafiltración. La nanofiltración se distingue por la capacidad de separar pequeños solutos del solvente, tales como iones de calcio y magnesio, resultando un suavizado del agua, sin adición de iones de sodio durante la filtración. Por lo que requiere de menos pretratamientos, comparado con la ósmosis inversa. La nanofiltración es una herramienta que puede remplazar la ósmosis inversa en algunos tratamientos, para reducir costos energéticos, reduciendo el mantenimiento y la operación [31].



La nanofiltración es una herramienta que puede reemplazar la ósmosis inversa en algunos tratamientos reduciendo costos energéticos, de mantenimiento y de operación. La nanofiltración respecto a la osmosis inversa muestra ser una alternativa viable para remover sulfatos, incrementando el permeado en un 20.0-30.0%, para las mismas condiciones de operación. En las plantas de NF para agua de mar ( $>2800 \text{ mg/l}$ ) utilizando electricidad de la red, las más favorables presentan 48% de recuperación, un flujo de  $15.3 \text{ l/h}$  y un consumo energético promedio de  $2.0 \text{ kWh/m}^3$ . Por otro lado, las plantas de NF fotovoltaica son enfocadas para desalinización de sistemas de  $500 \text{ mg/l}$  a  $2500 \text{ mg/l}$ . La NF-FV más favorable presenta 20% de recuperación, un flujo de  $3.2 \text{ l/h}$ , un consumo energético promedio de  $1.94 \text{ kWh/m}^3$ . Dado lo anterior, la NF-FV es una alternativa para sistemas de media salinidad como actividades agrícolas.

### 1.2.5. Modelado de generación fotovoltaica

Villalva *et al.* (2009) realizaron un modelado que ajusta el comportamiento real de un módulo. El modelo se solucionó mediante iteraciones, relacionando los datos iterados con el modelo del diodo real y las condiciones límite del módulo. El ajuste del modelo establece los valores de potencia-voltaje como condiciones de límite, para después calcular los valores de resistencia en serie y en paralelo por método iterativo. El modelo permitió reducir el error absoluto de los modelos reducidos sin considerar la resistencia en serie y en paralelo sobre todo en los errores cuando alcanza su punto máximo de un 0.52% a un 0.05%. El modelo obtenido es efectivo para el ajuste de la curva  $I-V$  ajustándose a las temperaturas reales y no solo a la temperatura estándar de pruebas experimentales obteniendo ajustes mejorados de 0.9-0.45% [37].

Boyd *et al.* (2011) realizaron un modelo que permite predecir el voltaje y corriente de salida de un módulo con información técnica otorgada por los proveedores, que denominaron “modelo de cinco parámetros”. El modelo está basado en el modelo del diodo real de Shockey, que considera la información técnica de las fichas de los proveedores, y realiza un ajuste de datos interpolados de acuerdo al comportamiento de la curva característica del módulo. Los módulos monocristalinos y policristalinos de silicio tienen un error residual,



considerando cielo despejado, de 3 y 6% respectivamente, los módulos CIS (Cobre, Indio, Selenio) del 6-10% y para los de silicio amorfo es de 20- 27%. El modelo de los cinco parámetros se utiliza para tecnología de silicio y para algunos de CIS, debido a que sus errores de predicción pueden estar dentro del intervalo de lo aceptable [36].

Amine *et al.* (2017) realizaron un modelado de un módulo fotovoltaico comercial codificado en MATLAB verificado con datos experimentales. Para su desarrollo identificaron los parámetros básicos de módulo potencia óptima, voltaje a circuito abierto, voltaje óptimo, intensidad de corriente a circuito abierto e intensidad de corriente óptimo, captura los datos en el modelo, luego los compara de manera experimental de manera controlada con temperatura e irradiación. En el estudio se determinó la curva de voltaje vs eficiencia, que presentó un error cuadrado de 0.0232, 0.0311 y 0.0643 para irradiaciones del 20%, 60% y 100% respectivamente, para  $1000 \text{ Wh/m}^2$  a  $25^\circ\text{C}$ . Los autores concluyen que las variaciones de irradiación y temperatura provoca grandes variaciones en el desempeño de los módulos fotovoltaicos [35].

En general el modelo aplicado en la literatura es el modelo de los cinco parámetros que contempla un error residual respecto a lo experimental entre el 4-15%. Este modelo requiere de parámetros que son típicos datos de fichas técnicas. Existen modelos con diferentes ajustes que mejoran la precisión con errores residuales de 0.9-0.45%. Por lo anterior, los modelos de ajuste del modelo de los cinco parámetros no tienen una mejora considerable como para dejar de emplear el modelo base. Pero se limita al uso de módulos monocristalinos y policristalinos.

### **1.2.6. Comparación del desempeño con otros sistemas de desalinización**

Sharon & Reddy (2015) realizaron un estudio comparativo sobre los procesos de desalinización convencionales y con energía renovable, donde se resaltan los sistemas con energía solar. El estudio comparó los procesos de desalinización solar directos, indirectos, de acuerdo a sus ventajas dimensionales, energía consumida, costo inicial, permeado y

complejidad. Las plantas de OI son las más atractivas para integrarse a un sistema de FV por su consumo energético de  $1.5-6.0 \text{ kW/m}^3$  y su razón de recuperación de 10-50%. Otros sistemas de desalinización la razón de recuperación no supera el 38%. Sin embargo, resulta adecuado una mayor investigación para la optimización energética y económica. La desalinización por medios solares son un medio sustentable para zonas remotas y rurales en donde la alimentación de energía y la instalación de líneas de tuberías no sean posibles [3].

Reif & Alhalabi (2015) compararon diferentes procesos de desalinización respecto a sus ventajas y desventajas, los cuáles son considerados los más rentables. El comparativo se realizó considerando la energía específica de sistemas instalados y volumen de agua desalinizada en diversas plantas alrededor del mundo. En la actualidad, los procesos que parecen ser los más rentables en el dominio de ocupar la energía solar, como fuente de energía, son los procesos directos. De los problemas principales para desalinización de agua por medios fotovoltaicos, es el alto costo, menor efectividad que los medios convencionales y el almacenamiento en baterías degrada el costo-efectividad de las plantas FV [39].

Zarzo & Prats (2018) realizaron un estudio bibliográfico de las tendencias y expectativas de la desalinización con energías renovables en España. El estudio consistió en encontrar las tecnologías más actuales, agrupándolas en un cuadro comparativo sobre sus fundamentos, fortalezas, retos, procesos, posibles usos y situación actual. La condición actual de la tecnología de desalinización fotovoltaica presenta altos consumos en los energéticos. Los costos de bombeo son los más críticos aumentando los costos entre 50-60%, a consecuencia del flujo de permeado. El mayor reto para la desalinización fotovoltaica consiste principalmente en reducir el consumo energético mediante la optimización del sistema de bombeo de dichos sistemas [38].

La desalinización por medios solares son un medio sustentable para zonas remotas y rurales en donde la alimentación de energía y la instalación de líneas de tuberías no sean posibles. Los problemas principales de la desalinización de agua por medios fotovoltaicos, son los altos costos, la baja efectividad comparada con medios convencionales como el diésel y sí

tienen almacenamiento, degrada el costo-efectividad de las plantas FV. Las plantas FV generan un costo promedio anual de \$ 17,265 USD y el sistema equivalente diésel un costo promedio anual de \$ 17,985 USD.

### 1.2.7. Análisis económico

Herold *et al.* (1998) demostraron la viabilidad de una planta de ósmosis inversa fotovoltaica de pequeña escala en el instituto tecnológico de las islas canarias. La demostración consistió en permear agua de pozo con un flujo mínimo de  $1.0 \text{ m}^3/\text{día}$  con sólidos totales disueltos mayores a  $500 \text{ mg/l}$ . El comportamiento energético y económico se simuló considerando los costos de inversión inicial y los costos de operación. El sistema mostró una factibilidad en el suministro de agua mayor del 96%. Sin embargo, el costo del producto fue de alrededor  $16.0 \text{ USD}/\text{m}^3$ , ocho veces más en referencia a los costos actuales del mercado. Los sistemas de ósmosis inversa fotovoltaica a pequeña escala consumen alrededor de tres veces más que un sistema de mediana escala, debido a las grandes presiones requeridas para su operación ocasionando altos costos energéticos y bajos caudales de permeado [44].

Tzen *et al.* (1998) realizaron un estudio de viabilidad de un sistema de desalinización fotovoltaica para áreas rurales. El estudio requirió de dimensionamiento previo que consistía en determinar el potencial solar de la zona, que en este estudio se trata de Chbeika central a 50 km de la costa de Marocco. Posteriormente se determinó la cantidad de agua permeada requerida, empleando una hoja de cálculo estimaron el permeado con la membrana aplicada. El análisis económico se realizó empleando los costos iniciales para la osmosis inversa (tanques, tubos, instalación y transporte), las unidades fotovoltaicas, baterías, inversor, sistema diésel auxiliar, edificación y consumibles, así como los costos de mantenimiento por periodo como son las baterías, membranas y el operador. Los costos totales por metro cubico producido de agua fueron de  $29 \text{ ECU}/\text{m}^3$  con un interés del 3% y  $32 \text{ ECU}/\text{m}^3$  con un interés del 5%. El costo de tratamiento por osmosis inversa aplicando energía fotovoltaica es elevado considerando que en otras regiones como Grecia e Italia tienen un costo de transporte por tanques del  $6 - 12 \text{ ECU}/\text{m}^3$  [43].

Ramírez & Recalde (2015) evaluaron económicamente la producción de agua potable mediante osmosis inversa, empleando energía renovable de pequeña escala en las costas de Cuba. La evaluación se presenta en la razón de consumo de energía por agua producida, para posteriormente realizar el costo total de la producción de agua para diferentes tecnologías; Viento-Fotovoltaico, Fotovoltaico, Viento-Diesel, Viento-Fotovoltaico-Diesel y Diesel-Fotovoltaico. La herramienta empleada para la simulación fue HOMER (Hybrid Optimization Model for Electricity Renewable) incorporando los costos iniciales, costos de operación y mantenimiento y otros costos. Para un permeado de  $5 \text{ m}^3/\text{día}$ , se obtiene un costo Viento-Fotovoltaico de  $16.9 \text{ \$/m}^3$ , Fotovoltaico  $41.6 \text{ \$/m}^3$ , Viento-Diesel  $14.46 \text{ \$/m}^3$  con una fracción renovable del 50%, Viento-Fotovoltaico-Diesel  $12.6 \text{ \$/m}^3$  con una fracción renovable del 66% y Diesel-Fotovoltaico  $10.5 \text{ \$/m}^3$  con una fracción renovable del 33%. Los costos varían por la cantidad de permeado. El estudio mostró que la producción de agua potable aplicando tecnologías renovables aun no es competitivo, pero considerando la evolución de los precios y la mejora de estos productos pueden llegar a serlo [42].

Moghadam (2019) determinaron la contribución económica de calentadores solares en 31 provincias de Irán. El estudio considero los costos de los equipos por área de colector e independientes del área de colector. El estudio se basó en el método de ahorros en ciclo de vida, aplicado la diferencia del costo en términos de ahorro de energía durante 20 años de vida del sistema. El estudio determinó que 23 provincias de 31 en Iran, contemplan en promedio un periodo de retorno de inversión de 6 años, con un valor actual neto de 7500 USD. Los resultados determinaron que los sistemas de calentamiento de agua presentan un periodo de retorno de inversión de 4 a 8 años, con una vida útil promedio de 30 años [41].

Schmitt (2020) identificó y caracterizó las oportunidades, barreras de infraestructura y programas de financiamiento para tecnologías de energía y agua. El análisis consistió en categorizar la tecnología ya empleada en Estados Unidos de América para determinar los beneficios y las oportunidades, posteriormente, categorizó los programas desarrollados su tiempo de vida y su tipo de financiamiento. El estudio demostró las oportunidades de infraestructura para proyectos energía-agua; interrelación energía-agua-energía, flexibilidad

de ubicación, demanda y recurso, reducción de vulnerabilidad a la sequía y costos energéticos. Para las oportunidades económicas fueron la flexibilidad de ubicación, ahorros más eficientes, nuevos servicios como venta de agua de desecho, reducción de costos de tratamiento. Las practicas que pueden incrementar las posibilidades de éxito son; enfoques integrales de proyecto, considerar los beneficios del proyecto más allá de lo inmediato, comunicación de beneficios a los beneficiarios y a los externos y acuerdos reales y sólidos con los patrocinadores [40].

Los sistemas de captación solar presentan un periodo de retorno de inversión de 4 a 8 años, con una vida útil promedio de 20 años. La producción de agua potable aplicando tecnologías renovables ronda entre 16.0 - 41.6  $USD/m^3$ . El costo de tratamiento mediante tecnología renovable aun no es competitivo, pero considerando la evolución de los precios y la mejora de estos productos pueden llegar a serlo. Los sistemas de ósmosis inversa fotovoltaica a pequeña escala consumen alrededor de tres veces más que un sistema de mediana escala. El costo promedio anual de estos sistemas es de \$ 17,265 USD y equivalente diésel de \$ 17,985 USD, siendo un poco mas rentable que con sistemas diésel.

### **1.2.8. Conclusiones de la revisión bibliográfica**

Los problemas principales de la desalinización de agua por medios fotovoltaicos, son los altos costos, la baja efectividad comparada con medios convencionales como el diésel y si tienen almacenamiento, degrada el costo-efectividad de las plantas FV siendo apenas \$ 500  $USD$  anuales más bajos que el costo promedio de su equivalente diésel. La NF-FV tiene un costo que ronda entre 16.0 - 41.6  $USD/m^3$ , siendo superiores en comparación con otros sistemas no renovables o de transporte de agua. La nanofiltración respecto a la osmosis inversa muestra ser una alternativa viable para remover sulfatos, incrementando el permeado en un 20.0-30.0%, a mismas condiciones de operación. Los estudios de la nanofiltración son limitados y determinaron que no era viable, pero considerando la evolución de los precios y la mejora de los sistemas el día de hoy pueden serlo.



La viabilidad de la nanofiltración se puede determinar mediante simulaciones efectuadas mediante un acoplamiento de modelos. Las simulaciones demostraron que el consumo energético aumenta y la calidad del permeado disminuye al incrementar la temperatura del agua de suministro. En aspectos experimentales para sistemas de desalinización mediante membranas presentan un consumo energético 2.00 y 6.99  $kWh/m^3$  donde las simulaciones deben estar dentro de ese rango.

Los modelos adecuados que pueden ser acoplados a la simulación son el modelo de los cinco parámetros, el modelo de Gherbi y el modelo de solución-difusión. El modelo de los cinco parámetros es el más empleado en la literatura presentando a lo experimental entre el 4-15% considerándose adecuado para su acoplamiento. El modelo de Gherbi simula el flujo a cualquier combinación de voltaje-corriente adecuándose a la pérdida de presión. El modelo de solución-difusión es suficiente para obtener una descripción confiable de los sistemas de nanofiltración con información básica otorgada por el proveedor.

## 1.3. Objetivos y alcances

En esta sección se describen los objetivos y los alcances del presente trabajo. El objetivo es desarrollar un modelo de desalinización mediante nanofiltración. Los objetivos específicos consisten en establecer la zona a estudiar, realizar una simulación acoplando modelos, validar la herramienta y optimizar el sistema.

### 1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo del consumo energético de un sistema de desalinización mediante nanofiltración solar a baja presión, basado en primera ley y modelado con circuitos de resistencia-capacitancia, para determinar la viabilidad de la nanofiltración.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer lugar de estudio y la capacidad de acuerdo a requerimientos típicos y al potencial del recurso solar.
- Modelar el potencial eléctrico del módulo fotovoltaico, el comportamiento de alimentación hidráulica del sistema y el permeado del sistema.
- Implementar y validar el simulador con resultados experimentales.
- Optimizar el sistema de nanofiltración solar para la zona de estudio mediante variación de parámetros.

### 1.3.3. Alcances

- Modelar un sistema de nanofiltración fotovoltaica en términos de su consumo energético por unidad de volumen permeado y costos nivelados.
- Las concentraciones de sólidos totales disueltos del agua salobre deben ser de 1000-3000 *mg/l*, para trabajar a bajas presiones hidráulicas de 1-10 *bar*, para permear 3.0  $m^3/d$ .
- La modelación se aplica para la localidad de Manuel Doblado, Guanajuato.
- La simulación se efectuará empleando TRNSYS<sup>®</sup> en periodo anual



## 1.4. Estructura de tesis

En el Capítulo 2 se presenta el marco teórico, los modelos aplicados para obtener información del proceso y la metodología empleada para la selección del lugar en términos de nivel de salinidad STD. En el Capítulo 3 se presenta la construcción de la plataforma de simulación fotoeléctrica, hidráulica, especies y económica, así como la verificación de la mismas. En el Capítulo 4 se presentan las gráficas de desempeño y tablas comparativas de energía específica, caudal de permeado, calidad del permeado, costos nivelados graficas de optimización. En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros.



# Capítulo 2 Fundamentos, Muestra y Metodología

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos para el desarrollo del presente trabajo, la muestra hablando en términos de calidad y potencial solar y la metodología empleada para la simulación.

## 2.1. Fundamentos teóricos

En esta sección se presentan una breve introducción de los fundamentos requeridos para la elaboración del presente trabajo.

### 2.1.1. Evaluación del recurso solar y recurso fotovoltaico.

En este apartado se provee una breve descripción de lo que es el recurso solar, como se evalúa el recurso y como se determina el recurso fotovoltaico.

#### 2.1.1.1 Recurso solar

El recurso solar se mide a partir de la radiación solar que es el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el sol. Las ondas electromagnéticas son consecuencia de las reacciones de fusión nuclear que se producen en la superficie solar. La longitud de onda y la frecuencia de las ondas electromagnéticas, son determinantes en la captación solar, ya que a consecuencia de la absorción o retención de estas ondas determinan la energía, su capacidad de penetración y disipación.

La radiación solar se clasifica en radiación directa, radiación difusa y radiación global. La radiación directa es la radiación recibida del sol sin ser dispersada por la atmosfera. La radiación difusa es la radiación recibida del sol después de que su dirección ha sido modificada por la atmosfera. La radiación global es la suma de la radiación directa y la radiación difusa.



La radiación puede ser medida mediante dos herramientas básicas: el pirheliómetro y el piranómetro. El pirheliómetro es un instrumento que utiliza un detector colimado para medir radiación solar y de una pequeña porción del cielo con una incidencia normal a la superficie. El piranómetro es un instrumento para medir radiación hemisférica total en una superficie horizontal. El instrumento está protegido por un anillo o disco de sombra, que al interponer la radiación y generar sombra el instrumento mide la radiación difusa. Estos determinan la cantidad de energía incidente en la superficie.

El recurso solar se puede determinar de diferentes formas dependiente principalmente de la condición en la que se trata, condiciones instantáneas (irradiancia) o durante un periodo de tiempo (irradiación). Gran parte de los datos de radiación disponibles son para superficies horizontales, que incluyen la radiación directa y difusa en periodos de tiempo. Los servicios meteorológicos producen datos del año meteorológico típico (Typical Meteorological Year, TMY) para ubicaciones específicas que presentan condiciones climáticas promedio en periodos de tiempo superiores a cinco años. Estos datos se destinan a emplearse para la predicción de rendimiento a largo plazo de los sistemas de captación solar.

Existe una gran cantidad de modelos que ayudan a determinar de manera matemática la radiación incidente en un plano inclinado representando la radiación directa y la difusa en intervalos de tiempo. Los métodos más empleados son: modelo Hay, el modelo de Davies, el modelo HDKR, el modelo de Neumann, modelo de Pérez, entre otros. El modelo más empleado para el recurso solar es el modelo de Pérez. El modelo de Pérez por su complejidad no se aborda en este trabajo de tesis evitando la extensión del mismo por lo que se sugiere revisar la referencia [45].

#### **2.1.1.2. Recurso fotovoltaico**

El recurso solar no se aprovecha por sí solo, por lo que se requiere de componentes que aprovechen el recurso. Los instrumentos comúnmente empleados para aprovechar el recurso solar son los colectores solares y los módulos fotovoltaicos. El módulo fotovoltaico es un dispositivo que transforma la energía solar en electricidad mediante efecto fotoeléctrico. Los materiales con el que están hechos los módulos fotovoltaicos son muy variados, pero

normalmente están hechos de silicio monocristalino. El fenómeno ocurre cuando un átomo de silicio en la red cristalina absorbe un fotón de la radiación solar incidente y si la energía del fotón es suficientemente alta, se libera de la capa externa del átomo. La estructura de la celda es muy similar a la composición de un diodo. La composición de la celda se muestra en la Figura 2.1, la parte expuesta a la radiación es la cuadrícula de contacto, seguida por el silicio dopado tipo-n, luego el silicio dopado tipo-p, por último, la base de contacto metálica.

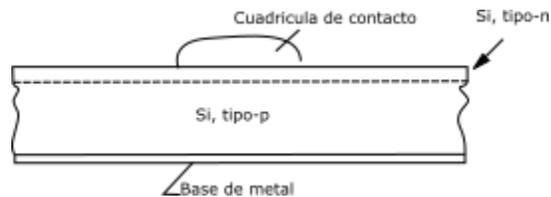


Figura 2.1 Composición celda fotovoltaica. [45]

Existe una gran variedad de modelos como el modelo de Sandia, el modelo de los cinco parámetros, entre otros. El modelo debe ser seleccionado de acuerdo al propósito y la necesidad. Sin embargo, la mayoría de los modelos se basan en la fórmula de Shockley del diodo real.[45]

### Fórmula de Shockley del diodo real

Shockley planteó un método para la simulación fotovoltaica en donde el módulo se considera como un diodo. El diodo tiene características muy similares a los módulos fotovoltaicos, con la diferencia del material fotosensible del que está hecho. El modelo consiste en un arreglo de circuito equivalente que se muestra en la Figura 2.2. La analogía del modelo consiste en suministrar una fuente de energía  $V I_{ph}$ , en paralelo un diodo  $D$ , interpretando al módulo fotovoltaico, con una serie de resistencias que interpretan la resistencia por la derivación de las celdas en paralelo  $R_{sh}$  y en serie  $R_s$ ,

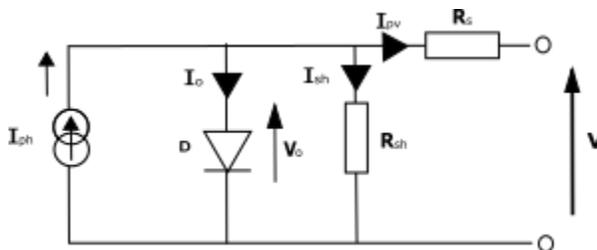


Figura 2.2 Circuito representativo del módulo fotovoltaico

El suministro de corriente se obtiene considerando las ecuaciones de continuidad, de la ley de Ohm:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o - I_{sh} \quad (2-1)$$

donde  $I_{pv}$  es la corriente suministrada por el módulo, es igual a la corriente generada por el fenómeno de fotosensibilidad  $I_{ph}$ , menos la corriente disipada por el módulo  $I_o$  por el *bangab* de flujo de electrones sobre los materiales del módulo, menos la corriente disipada por la resistividad de las celdas que conforman el módulo  $I_{sh}$ .

La corriente generada por el fenómeno de fotosensibilidad  $I_{ph}$ , se estima mediante la ecuación (2-2), donde;  $I_{ph,n}$  es la corriente nominal generada por el módulo,  $K_I$  es la constante de fabricación,  $T$  es la temperatura en condiciones de clima actual,  $T_n$  es la temperatura nominal,  $G$  es la irradiación en la superficie del dispositivo y  $G_n$  es la Irradiación nominal.

$$I_{ph} = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \quad (2-2)$$

La corriente disipada por el módulo  $I_o$ , se emplea la ecuaciones del diodo real mostrado en la ecuación (2-3), donde;  $I_{sat}$  es la corriente inversa de saturación del diodo,  $V$  es el voltaje de alimentación del módulo,  $R_s$  es la resistividad de las celdas en serie, y  $V_T$  es la potencia térmica. La potencia térmica se obtiene de la ecuación del gas ideal obteniendo la ecuación (2-4) en dónde;  $Ns$  es el número de celdas en serie,  $K$  es la constante de Boltzman y  $q_e$  es la carga del electrón.

$$I_o = I_{sat} \left( e^{\frac{V+I*R_s}{K_I*V_T*T}} - 1 \right) \quad (2-3)$$

$$V_T = \frac{Ns * K * T}{q_e} \quad (2-4)$$

La ecuación (2-3) se sustituye en la ecuación (2-4) obteniendo la ecuación (2-5).

$$I_o = I_{sat} \left( e^{K_I * \left( \frac{V+I*R_s}{Ns*K*T} \right) * T} - 1 \right) \quad (2-5)$$

Por último la corriente disipada por la resistividad de las celdas  $I_{sh}$  se obtiene mediante la ley de Ohm desglosada en la ecuación (2-6) donde;  $V_o$  es el voltaje consumido por la resistencia de las celdas en paralelo y  $R_{sh}$  es la resistencia generada por las celdas en paralelo.

$$I_{sh} = \frac{V_o}{R_{sh}} = \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (2-6)$$

La ecuación de dominio se obtiene sustituyendo las ecuaciones (2-2), (2-5) y (2-6) en la ecuación (2-1):

$$I = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{V + I * R_s}{K_I * \left( \frac{N_s * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (2-7)$$

## 2.1.2. Nanofiltración

En este apartado se provee una breve descripción de los fundamentos de la nanofiltración para el desarrollo del trabajo.

### 2.1.3.1. Nanofiltración

La nanofiltración es un proceso de separación a nivel molecular, debido al tamaño de poro de la membrana semipermeable, permite el paso a las moléculas más pequeñas de una solución. Este proceso ocurre por la diferencia de potencial hídrico, que induce a la solución pasar a través de la membrana. La solución 1 que contiene mayor potencial hídrico inducido por la presión, desplaza el volumen de agua que pasa a través de la membrana hasta el lado de la solución 2 con menor potencial hídrico como se representa en la Figura 2.3 a), hasta alcanzar el equilibrio mostrada en la Figura 2.3 b).

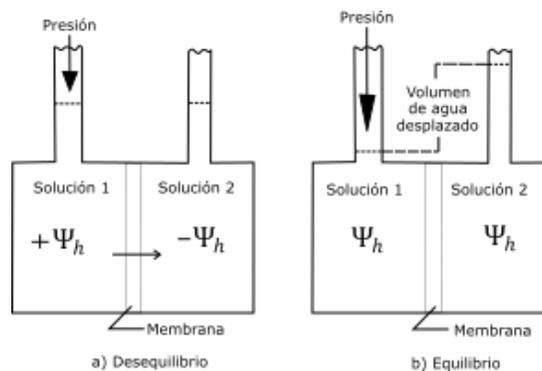


Figura 2.3 Representación del proceso de la nanofiltración



El permeado es el volumen de agua desplazado de una solución de bajo potencial hídrico es sometida a presión desplazando el volumen a una solución de alto potencial hídrico. El proceso de permeado de una solución se le conoce como nanofiltración. El proceso de nanofiltración tiene sus limitantes a nivel molecular, solo algunas partículas pueden ser removidas mediante este proceso. Las membranas semipermeables son delicadas por lo cual estos procesos requieren procesos previos para retener partículas de gran tamaño. El implementar procesos previos prevenimos el desgaste de la membrana y mejora la calidad del producto

La nanofiltración puede ser reproducida matemáticamente mediante las ecuaciones (2-8) y (2-9), correspondientes a la primera ley de Fick de la difusión para una mezcla de dos componentes [46]:

$$J_w = -D_{wv} \frac{dC_w}{dx} \quad (2-8)$$

La densidad de flujo de agua  $J_w$  es proporcional al gradiente de concentración de agua  $dC_w$  respecto al espesor de la membrana  $dx$  y el coeficiente de difusión del material semipermeable  $-D_{wv}$  en dirección del flujo normal  $wv$  de la mezcla a la membrana. Debido al principio de conservación de la materia la densidad de flujo de permeado del soluto  $J_v$  se comporta de manera similar es proporcional al gradiente de concentración del soluto  $dC_v$  respecto al espesor de la membrana  $dx$  y el coeficiente de difusión del material semipermeable  $D_{vw}$  en dirección del flujo normal  $vw$  de la membrana a la mezcla como se representa en la ecuación (2-9).

$$J_v = D_{vw} \frac{dC_v}{dx} \quad (2-9)$$

### 2.1.3.1. Potencial hídrico

El potencial hídrico es la capacidad de las moléculas de agua para moverse en un sistema particular a otro, dependiente de su energía libre. La magnitud empleada para expresar y medir el estado de energía libre del agua es el potencial hídrico  $\Psi_h$  que determina la dirección de las moléculas en el agua. El estado de referencia del potencial hídrico se alcanza solo cuando la masa de agua es pura, libre, sin interacciones con otros cuerpos, a presión normal



a nivel del mar, este valor le corresponde un  $\Psi_h$  igual a “cero”. El potencial hídrico  $\Psi$  está fundamentalmente determinado por el efecto osmótico, asociado con la presencia de solutos, por las fuerzas mátricas que adsorben o retienen agua en matrices sólidas o coloidales, por el efecto de la altura y por presiones positivas o negativas o tensiones presentes en los recipientes o conductos donde se encuentra. Estos factores tienen un efecto aditivo que típicamente disminuye el potencial hídrico del medio con respecto al potencial del agua pura. Provocando que exista una diferencia de potencial hídrico, en donde una masa de agua fluye del de mayor potencial al de menor potencial hídrico hasta llegar a su punto de equilibrio. El potencial hídrico total es la suma algebraica de cuatro componentes expresada en la ecuación (2-10).

$$\Psi_h = \Psi_o + \Psi_m + \Psi_g + \Psi_p \quad (2-10)$$

El potencial osmótico ( $\Psi_o$ ) representa la presencia de solutos disueltos, que disminuyen la energía libre de las partículas de agua, muchas veces se relaciona con la presión osmótica  $\pi = -\Psi_o$  donde este se determina a partir de la ecuación del gas ideal y la relación de Van't Hoff, obteniendo la ecuación (2-11).

$$\Psi_o = -RTC_s \quad (2-11)$$

El potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) es la capacidad del cuerpo de retener agua debido a las interacciones con matrices solidas o coloidales. Estas se constituyen de material coloidal del suelo y las paredes celulares. Esta es similar  $\Psi_o$  salvo que la consecuencia es provocada por las fuerzas superficiales. Se considera, que los intercambios de agua están controlados por lo que usualmente la contribución matriz se desprecia.

El potencial gravitatorio ( $\Psi_g$ ) representa la influencia del campo gravitatorio, esta depende principalmente de la posición de referencia, obtenida por la ecuación (2-12).

$$\Psi_g = \rho gh \quad (2-12)$$

Por último, el potencial de presión ( $\Psi_p$ ) representa la presión hidrostática que se ejerce sobre el cuerpo, externa de los efectos gravitatorios, suelen ser por fuerzas externas.[47]



### 2.1.3. Clasificación de cuencas

Las cuencas son concavidades naturales del terreno, formadas por el desplazamiento de las placas tectónicas, desplazamientos de agua y de vegetación, definidas por la existencia de una división de las aguas debida a la conformación del relieve. Existen tres tipos de cuencas hidrográficas: las **cuencas exorreicas**, descargan sus aguas al mar; las **cuencas endorreicas**, descargan sus aguas a un cuerpo de agua continental como un lago o bolsón; y las **cuencas arreicas**, las cuales no desembocan sus aguas ni en lagos, ni en mares, pues se evaporan o se infiltran al suelo.

## 2.2. Muestra (Lugar de estudio y calidad del agua)

En esta sección se establece el lugar de estudio, una breve descripción del funcionamiento del sistema de nanofiltración fotovoltáica, la metodología y los modelos empleados para el trabajo.

### 2.2.1. Localización y clima (Recurso solar)

En la selección del lugar de estudio se consideró la calidad del recurso hídrico, la demanda de agua y el recurso solar. La calidad del recurso hídrico se obtuvo de fuentes nacionales, se seleccionaron las cuencas que por naturaleza tiende a incrementar su nivel de salinidad, la selección se establece de acuerdo a la calidad que presente en el último reporte. La demanda de agua se determinó de acuerdo a los distritos de riego operativos en la república, a mayor superficie de riego mayor demanda. El recurso solar se consideró la zona con mayor potencial de captación, de acuerdo a la irradiación global horizontal promedio diaria ( $kWh/m^2-dia$ ) de lugares propuestos por su calidad y superficie de riego.

#### 2.2.1.1 Localización de cuencas

En la Figura 2.4 se muestra la ubicación geográfica de las cuencas hidrológicas de México. Las cuencas que por naturaleza incrementan la salinidad son las cuencas endorreicas, las cuales descargan las aguas a un cuerpo de agua continental como un lago o bolsón. Su importancia radica a la tendencia de incrementar su nivel de salinidad con el paso del tiempo.



Figura 2.4 Tipos de cuencas hidrológicas de México

La salinidad en las cuencas endorreicas son determinados por estudios realizados por CONAGUA [12]. En la Figura 2.5 muestra las cuencas endorreicas y la calidad del agua en términos de sólidos disueltos totales superiores de 1000 mg/l, consideradas como media y alta salinidad. De lo anterior podemos observar que las cuencas endorreicas y las costas son las zonas potenciales de estudio. Sin embargo, las costas sufren salinidad principalmente por intrusión salina ocasionada por el agua de mar, por lo cual son descartadas. La cantidad de cuencas es muy basta para la selección del lugar por lo que requirió un segundo filtro para su selección.

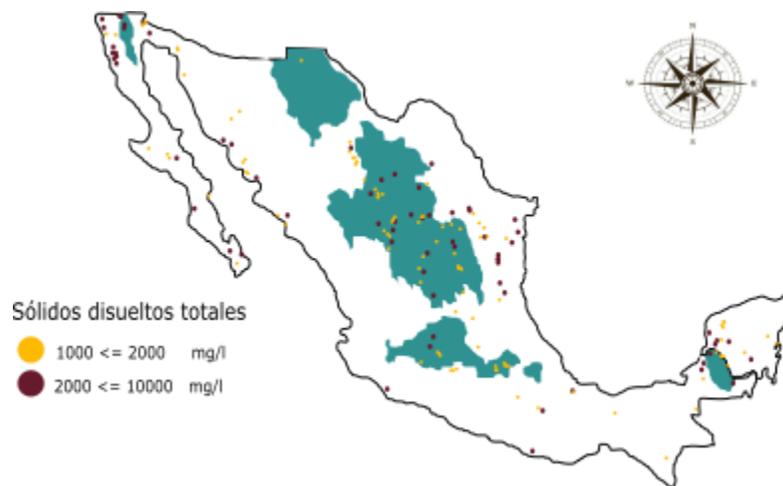
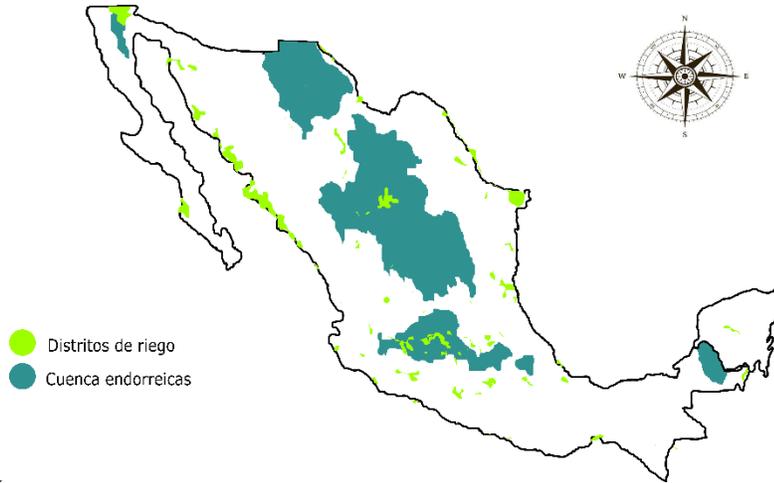


Figura 2.5 Distribución de cuencas endorreicas disponibles, con SDT medidos en campo

México cuenta con grandes extensiones de tierra que se usan exclusivamente para la agricultura que se conocen como distritos de riego. Los distritos de riego son proyectos de

irrigación desarrollados por el Gobierno Federal de México desde 1926, año de creación de la Comisión Nacional de Irrigación, que incluyen diversas obras tales como vasos de almacenamiento, derivaciones directas a plantas de bombeo, pozos, canales y caminos entre



otros. En la

Figura 2.6 se muestran los distritos de riego de la republica de acuerdo a su extensión geográfica.

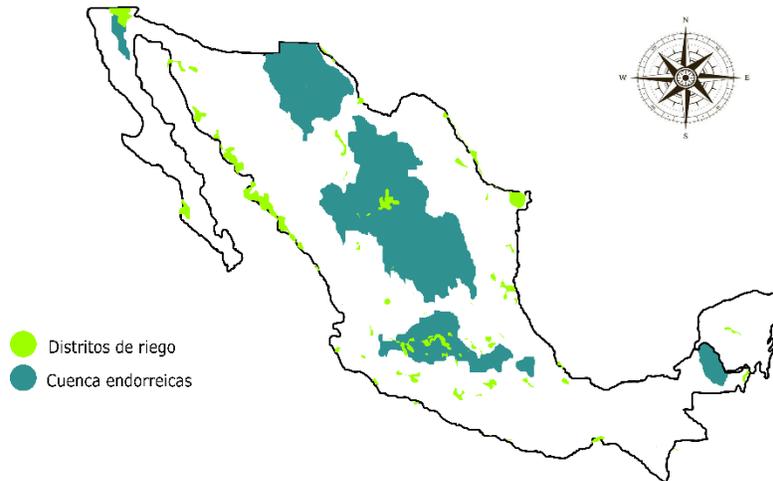


Figura 2.6 Distritos de riego

De lo anterior, las ciudades propuestas para el uso de la tecnología de nanofiltración se muestran en la Tabla 2.1. La prioridad en el estudio es de acuerdo a la extensión del distrito de riego, por conveniencia económica e imparto por acceso a las mismas. El segundo término prioritario es la calidad del agua en la proximidad del distrito de riego.

Tabla 2.1 Utilización de la tierra y salinidad de los pozos de riego cercanos

Estado	Cuenca endorreica	Núm. de acuíferos con salinidad	Ciudad	SDT [mg/l]	Superficie de riego total [ha]	Condición salación *	Condición acuífera
Baja California	Pozo San Agustín	20	Ensenada	12648	178593.00	IS	Sobreexplotado
Guanajuato	Pozo ejido La calzada	7	Manuel Doblado	3966	96476.90		Sobreexplotado
Michoacán	Briseñas-Yurecuaro	3	Vista Hermosa	1609	82443.00		Sobreexplotado
Chihuahua	Laguna de Palomas	14	Jimenez	2340	64173.00	FSS	Sobreexplotado
Durango	---	16	Ceballos	2390	62218.64	FSS	Sobreexplotado

\* IS=Intrusión salina, FSS=Fenómenos de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres

En la Figura 2.7 se muestra la ubicación geográfica de los lugares propuestos, presentando la cuenca, la calidad del agua y la extensión del distrito de riego. se clasifican de acuerdo a los fenómenos de intrusión salina y de suelos debido a la erosión del suelo que pueden llegar a causar, dejando la tierra incapaz de continuar su producción.

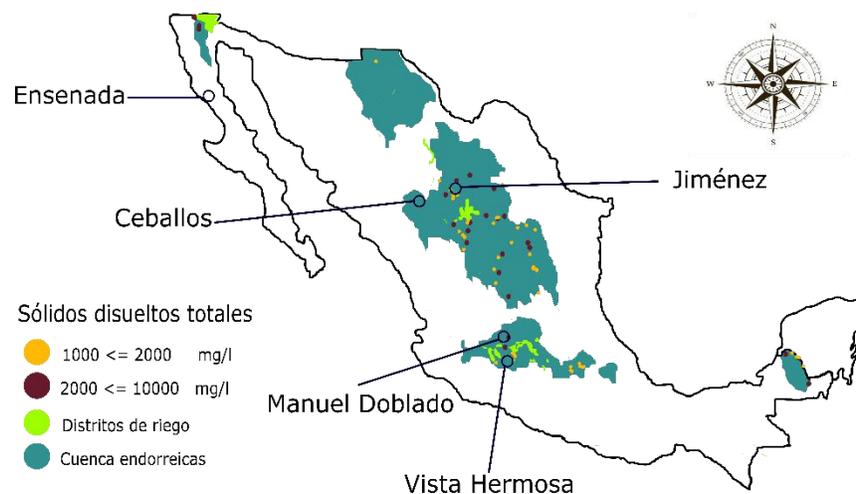


Figura 2.7 Distritos de riego Ubicación geográfica de las posibles zonas de estudio

### 2.2.1.2 Recurso solar en la zona de estudio

En la Figura 2.8 se presenta el mapa de la republica con la irradiación promedio horizontal en donde se puede apreciar las zonas propuestas para el estudio. Las zonas propuestas para el estudio presentan radiaciones entre 5.0 - 6.3 kWh/m<sup>2</sup> promedio diario.

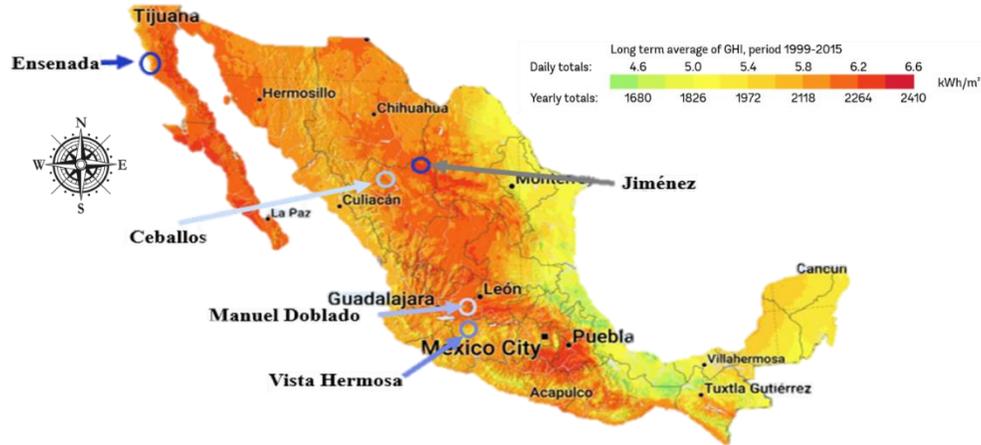


Figura 2.8 Ubicación geográfica de las posibles zonas de estudio

En la Tabla 2.2 se presenta las localidades potenciales organizadas de mayor a menor irradiación global horizontal promedio diaria, seguido por el potencial fotovoltaico, posteriormente por la temperatura promedio anual [11]. La irradiación global horizontal se presenta como la irradiación incidente sobre la superficie sin inclinación en promedio diario. El potencial fotovoltaico es la capacidad de energía capaz de generar el sistema fotovoltaico a su ángulo óptimo de incidencia con una irradiación pico de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

Tabla 2.2 Recurso solar de las zonas potenciales de estudio

Estado	Ciudad	Irradiación global horizontal GHI [kWh/m <sup>2</sup> ]	Potencia Fotovoltaico [kWh/kWp]	Temperatura promedio [°C]
Durango	Ceballos	6.274	5.329	21.6
Guanajuato	Manuel Doblado	6.134	5.121	18.2
Michoacán	Vista Hermosa	6.134	5.096	18.4
Chihuahua	Jimenez	6.093	5.241	20.1
Baja California	Ensenada	5.529	4.929	18.3

Ensenada a pesar de ser la ciudad con un alto contenido de sales y grandes superficies de riego presenta el menor potencial solar. Por otro lado, la ciudad con mayor potencial solar es Ceballos, pero con menor superficie de riego pudiendo no impactar la tecnología. Por lo tanto, la localidad que presenta buen potencial solar y una superficie de riego amplia es la ciudad de Manuel Doblado. Manuel Doblado presenta una irradiación horizontal de

6.134 kWh/m<sup>2</sup> con un potencial fotovoltaico de 5.121 kWh/kWp a una temperatura promedio anual de 18.2 °C.

## 2.2.2. Manuel Doblado

La ciudad de Manuel Doblado, está situada a 101° 57' 12'' de longitud oeste del Meridiano de Greenwich a 20° 43' 49'' latitud norte a altura sobre el nivel del mar es de 1725 m. En la Figura 2.9 se muestra la ubicación de la localidad en el estado de Guanajuato y las cercanías del mismo. El clima es templado con una temperatura media anual de 20.5°C, con una máxima de 38.5°C y mínima de 2.6°C. La actividad económica principal de la ciudad es el cultivo agrícola y pastoreo para la cría de ganado [48]. La economía del municipio es mayormente agrícola con el 33.7% de su PIB según los datos del censo económico del 2010 INEGI, (2010), con una producción principalmente de en el sorgo, maíz y trigo.



Figura 2.9 Ubicación de Manuel Doblado.

Los datos meteorológicos de la localidad de Manuel Doblado, Guanajuato se obtienen de Meteornorm<sup>®</sup> 7.3. En la cercanía de la cuenca se encuentra el pozo ejido la calzada. En general el agua tiene una salinidad de 3966 mg/l [13] considerándose salada con aplicación limitada para aplicaciones domésticas, agrícolas e industriales.

## 2.2.3. Sistema de nanofiltración solar

El sistema solar de nanofiltración se compone de: una fuente de alimentación de agua salina, un arreglo de módulos fotovoltaicos, una bomba de corriente directa (DC), un filtro de microfiltración, un arreglo de membranas de nanofiltración, un tanque de almacenamiento para fluido permeado y otro almacenamiento de fluido de rechazo. La fuente de alimentación

de agua salina es la cuenca en la cual se le instala una bomba de agua. La bomba es alimentada por energía fotovoltaica producida por los módulos fotovoltaicos. La bomba desplaza el agua salina fluyendo a través de un microfiltró que remueve los contaminantes externos como polvos disueltos en el agua. Posteriormente, el agua atraviesa las membranas de nanofiltración, donde, el fluido se descompone en dos, un flujo de permeado y otro de rechazo.

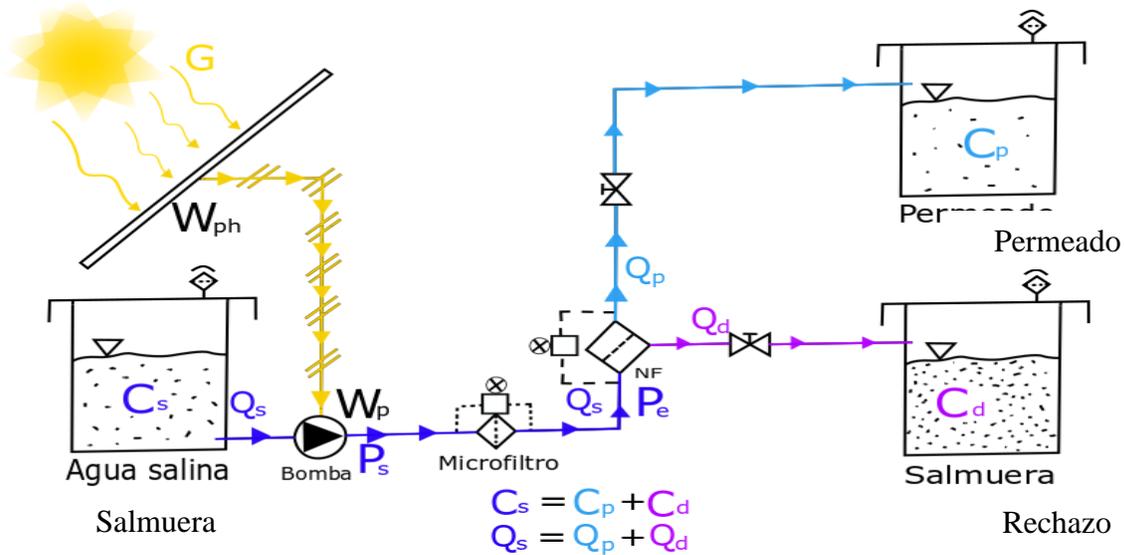


Figura 2.10 Sistema de nanofiltración solar

La Figura 2.10 se muestra el modelo físico del sistema de nanofiltración en donde se puede observar que mediante la irradiación incidente  $G$  en la superficie del módulo fotovoltaico. El módulo por efecto fotoeléctrico genera una potencia eléctrica  $W_{ph}$ . La potencia eléctrica generada  $W_{ph}$  induce a la bomba  $W_p$  la cual impulsa agua con una concentración salina  $C_s$ , a una presión  $P_s$  y un flujo  $Q_s$  variable. El flujo de agua impulsado  $Q_s$  pasa a través de un sistema de tuberías y un filtro que ocasiona pérdidas de energía, posteriormente el flujo de agua pasa por la membrana de nanofiltración con un caudal  $Q_s$  igual, pero una presión  $P_e$  inferior a la presión de suministro  $P_s$ . La  $P_e$  vence la presión osmótica  $\Delta\pi$  de la solución produciendo un flujo de permeado  $Q_p$  y un flujo de rechazo  $Q_d$ . El flujo de permeado  $Q_p$  presentara una menor concentración de sales  $C_p$ , por conservación, el caudal de rechazo  $Q_d$  obtiene una concentración de sales de rechazo  $C_d$  mayor al de permeado.

La simulación del sistema de nanofiltración fotovoltaica requiere un conjunto de modelos de simulación acoplados para obtener los valores de interés el  $Q_p$  y  $C_p$ . Los modelos empleados para la simulación se presentan en la sección 2.3.

## 2.3. Modelos

En la Figura 2.11 se muestra el acoplamiento de modelos fotovoltaico, hidráulico, de especies y económico que se emplearon en la simulación del sistema de nanofiltración. El modelo fotovoltaico se alimenta con las condiciones climáticas de irradiancia  $G$  y temperatura del aire  $T_{air}$  entregando como salida el punto de potencia máxima  $W_{ph_{mppt}}$ , a una tensión  $V_{mppt}$  e intensidad  $I_{mppt}$ . El modelo hidráulico toma como entrada la tensión y la intensidad del punto máximo de potencia otorgando como salida el caudal  $Q_s$  y la presión  $P_s$  de suministro. El modelo de especies toma como entrada el caudal de suministro, la presión de suministro, las condiciones de temperatura del agua  $T_w$  y calidad del agua de suministro  $SDT_{in}$ , otorgando como salida el caudal de rechazo  $Q_R$  a una calidad de rechazo  $SDT_R$  y el caudal de permeado  $Q_p$  a la calidad de permeado  $SDT_p$ . El modelo económico toma como entrada el caudal de permeado, el costo por metro cubico de agua en la localidad, los costos iniciales, los costos de mantenimiento, dando como salida el valor actual neto VAN, tasa interna de retorno TIR.

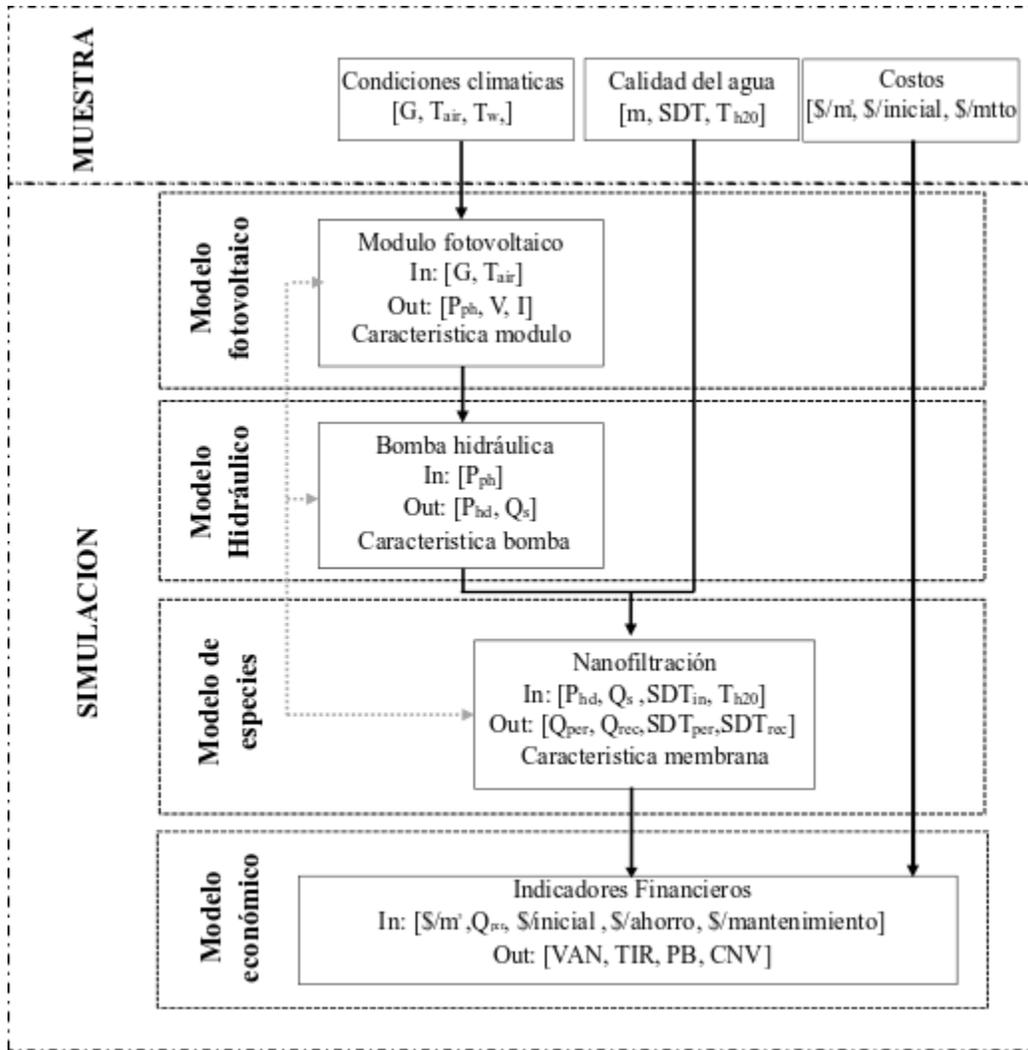


Figura 2.11 Acoplamiento de modelos

### 2.3.1. Modelo fotovoltaico

El modelo de los cinco parámetros emplea la Ecuación (2-14), que corresponde a la del diodo real, de Shockley presentado en la sección 2.1.1.2, El modelo de los cinco parámetros consiste en un arreglo de ecuaciones empleando los parámetros característicos del módulo otorgados por el proveedor. El modelo se ha venido utilizando por su bajo nivel de incertidumbre en relación al número de parámetros involucrados, de acuerdo a los requerimientos de los estándares más comunes.

$$I = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{V + I * R_s}{K_I * \left( \frac{NS * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (2-13)$$

En general, el modelo permite determinar la potencia de suministro (VI), la tensión y la corriente en el punto máximo de potencia de acuerdo a la irradiación en la superficie del dispositivo  $G$ , la temperatura en condiciones de clima actual  $T$ . Los parámetros de entrada se presentan en la Tabla 2.3, los cuales se sustituyen en la Ecuación (2-7) para construir una matriz de ecuaciones donde, la corriente generada en el módulo en condición nominal  $I_{ph,n}$  la corriente nominal generada por el módulo  $K_I$ , la temperatura nominal  $T_n$ , la irradiación nominal  $G_n$ , la corriente inversa de saturación del diodo  $I_{sat}$ , la resistividad de las celdas en serie  $R_s$ , el número de celdas en serie  $NS$  y la resistencia generada por las celdas en paralelo  $R_{sh}$  son valores otorgados por el fabricante. La constante de Boltzman  $K$  y la carga del electrón  $q_e$  son contantes conocidos.

Tabla 2.3 Parámetros característicos de módulo fotovoltaico.

Dato	Unidad	Descripción	Ecuación
$I_{sc}$	[A]	Corriente a corto circuito	(2-14)
$V_{oc}$	[V]	Voltaje a circuito abierto	(2-15)
$I_{mp}$	[A]	Corriente a máxima potencia	(2-16)
$V_{mp}$	[V]	Voltaje a máxima potencia	(2-16)
$\alpha_{I_{sc}}$	[A/°C]	Coficiente de temperatura de corriente a corto circuito	(2-17)
$\beta_{V_{oc}}$	[V/°C]	Coficiente de temperatura de voltaje a circuito abierto	(2-18)

$$I_{sc} = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{I_{sc} * R_s}{K_I * \left( \frac{NS * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{I_{sc} * R_s}{R_{sh}} \quad (2-14)$$

$$0 = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{V_{oc}}{K_I * \left( \frac{NS * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (2-15)$$

$$I_{mp} = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{V_{mp} + I_{mp} * R_s}{K_I * \left( \frac{NS * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{V_{mp} + I_{mp} * R_s}{R_{sh}} \quad (2-16)$$

$$\alpha_{I_{sc}} = \frac{I_{sc,2} - I_{sc,1}}{T_{sc,2} - T_{sc,1}} \quad (2-17)$$

$$\beta_{V_{oc}} = \frac{V_{os,2} - V_{os,1}}{T_{sc,2} - T_{sc,1}} \quad (2-18)$$

$$I = \left( I_{ph,n} + K_I * (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} - I_{sat} \left( e^{\frac{V + I * R_s}{K_I * \left( \frac{NS * K * T}{q_e} \right) * T}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (2-19)$$

La solución de la matriz generada se soluciona por método iterativo, encontrando los valores de  $I$  y  $V$  para cada variación climática  $G$  y  $T$ . Para un mejor entendimiento del modelo se sugiere la referencia [45].

### 2.3.2. Modelo hidráulico

La modelación del caudal del sistemas de nanofiltración se realizó con el modelo de Gherbi [28], que se obtiene de una matriz de ecuaciones que relaciona la intensidad de corriente  $I$  y el caudal de suministro  $Q$  en función, de la carga  $h$  y la tensión de alimentación  $V$ . La intensidad de corriente  $I$  se relaciona con el producto de tensión  $V$  y la carga  $h$  en un modelo lineal ecuación (2-20). El caudal de suministro  $Q$  en relación del producto de la tensión  $V$  y la carga  $h$  en un modelo parabólico ecuación (2-21). Las variables de las ecuaciones (2-20) y (2-21) se encuentran en función de  $h$  con un comportamiento polinomial de tercer grado ecuaciones se complementa con las ecuaciones polinomiales de tercer grado, obteniendo las Ecuaciones (2-22), (2-23), (2-24), (2-25) y (2-26)

$$I(V, h) = a(h)V + b(h) \quad (2-20)$$

$$Q(V, h) = c(h)V^2 + d(h)V + e(h) \quad (2-21)$$



$$a(h) = a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3 \quad (2-22)$$

$$b(h) = b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3 \quad (2-23)$$

$$c(h) = c_0 + c_1h + c_2h^2 + c_3h^3 \quad (2-24)$$

$$d(h) = d_0 + d_1h + d_2h^2 + d_3h^3 \quad (2-25)$$

$$e(h) = e_0 + e_1h + e_2h^2 + e_3h^3 \quad (2-26)$$

En la Figura 2.12 se muestra la metodología de Gherbi. El procedimiento comienza en localizar en diferentes puntos de funcionamiento en la curva característica. El caudal  $Q$ , la carga  $h$ , la potencia  $W$ , y la eficiencia  $\eta$  se obtienen de diferentes puntos de funcionamiento de la curva sustituyendo en la Ecuación (2-27) para obtener la tensión de alimentación  $V$  donde  $I_{prom}$  es la corriente promedio de suministro del módulo fotovoltaico de un estudio previo.

$$V = \frac{W\eta}{I_{prom}} \quad (2-27)$$

Cuando la tensión de alimentación  $V$  sea mayor que la tensión máxima de suministro de la bomba  $V_{max}$  la tensión se convierte en  $V = V_{max}$  manteniéndose constante por lo que la intensidad de corriente  $I$  se convierte en nuestra variable en función de la potencia  $W$  y tensión  $V_{max}$ . La intensidad de corriente  $I$ , el caudal de suministro  $Q$ , la tensión de alimentación  $V$ , y la carga  $h$  se sustituyen en las ecuaciones (2-20), (2-21), (2-22), (2-23), (2-24), (2-25) y (2-26) hasta generar dos matrices de ecuaciones una con ocho incógnitas y otra con doce incógnitas. Las incógnitas  $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3, d_0, d_1, d_2, d_3, e_0, e_1, e_2$  y  $e_3$  se determina mediante un sistema de solución de matrices.

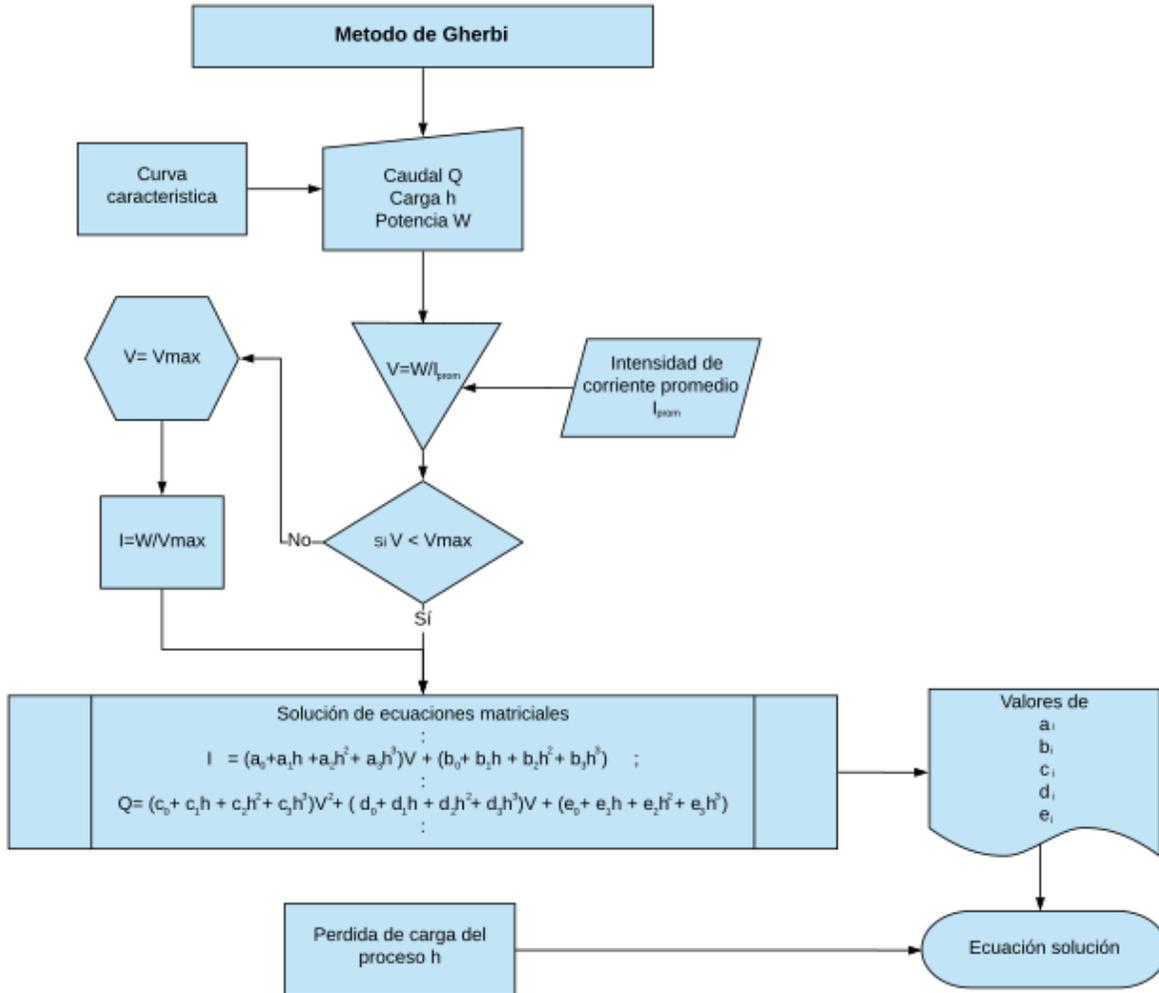


Figura 2.12 Metodología de Gherbi para modelo hidráulico

Las pérdidas de presión  $P_L$  del sistema son determinadas y sustituidas en las ecuaciones (2-22), (2-23), (2-24), (2-25) y (2-26) como la carga  $h$ . El caudal de alimentación  $Q$  y la tensión quedan en función de la tensión de suministro  $V$ .

### 2.3.3. Modelo de especies

El modelo de concentración polarización se basa en la ecuación de Hagen Poiseuille [20]. el caudal de permeado  $Q_P$ , se determina con la Ecuación (2-28), en función de la diferencia de presión  $\Delta P$ , la viscosidad dinámica del medio solvente  $\mu$  en conjunto con la resistencia total del medio solvente  $R_T$ .

$$Q_p = \frac{1}{\mu R_T} \Delta P \quad (2-28)$$

La resistencia total del medio solvente  $R_T$  es la suma las resistencias de los solutos  $R_m$  del soluto  $k$  del número total de solutos  $n$  en el solvente, de acuerdo a la Ecuación (2-29).

$$R_T = \sum_k^n R_{m,k} \quad (2-29)$$

Las resistencias de los solutos  $R_{m,k}$  se determinan de acuerdo a la Ecuación (2-30) donde  $r_p$  es el radio efectivo del poro,  $\delta$  es el espesor efectivo de la membrana y  $A_k$  es la porosidad efectiva para el soluto  $k$ .

$$R_{m,k} = \frac{8\delta}{r_p^2 A_k} \quad (2-30)$$

La diferencia de presión  $\Delta P$  entre la presión de suministro  $P_s$  y la presión osmótica,  $\Delta\pi$  como se aprecia en la Ecuación (2-31).

$$\Delta P = P_s - \Delta\pi \quad (2-31)$$

donde  $\Delta\pi$  es la presión osmótica reportada por el fabricante. La Ecuación (2-32), se basa del modelo matemático de la presión osmótica. La calidad del fluido de permeado  $C_p$ , se determina con la Ecuación 2-19, y representa la diferencia de la calidad del fluido de alimentación  $C_f$  y la calidad del fluido de rechazo  $C_R$ .

$$C_p = C_f - C_R$$

donde  $C_R$  se determina de la Ecuación (2-32) que es la partición de la presión osmótica  $\Delta\pi$  respecto al producto de la temperatura del medio solvente  $T_{cp}$  por la constante de los gases  $R$ .

$$C_R = \frac{\Delta\pi}{T_{cp}R} \quad (2-32)$$

### 2.3.4. Modelo económico

La tasa interna de retorno TIR, el plazo de recuperación PB y el costo nivelado CNV. La TIR es el porcentaje de beneficio o pérdida que tendrá una inversión para las cantidades que no se han retirado del proyecto. El PB es el tiempo medido en años en el que la inversión inicial es recuperada. El CNV es la valoración económica del sistema a lo largo de la vida útil del proyecto considerando los costos del mismo.

se utilizan en el comparativo financiero para optimizar energética y económica el sistema. La TIR, PB y CNV se determinan con las ecuaciones (2-33), (2-34) y (2-35), respectivamente;  $F_o$  es la inversión inicial,  $n$  son los años de vida del sistema o del proyecto,  $F_i$  es el ahorro en el año  $i$ ,  $k$  es la tasa de descuento,  $l$  es la inflación de los productos,  $r$  es el año de recuperación de la inversión,  $T_{r-1}$  es el año inmediatamente anterior de recuperación de inversión,  $C_i$  los costos de producción y mantenimiento en el año  $i$  y  $P_i$  es la producción de permeado en el año  $i$ , . La TIR se determina de manera iterativa hasta lograr una diferencia mínima entre ambos lados de la igualdad. [49]

$$F_o = \sum_{i=1}^{t=n} F_i \left( \frac{1+l}{1+TIR} \right)^i \quad (2-33)$$

$$PB = T_{r-1} + \frac{\sum_{i=1}^{r-1} F_i \left( \frac{1+l}{1+k} \right)^i - F_o}{\sum_{i=1}^r F_i \left( \frac{1+l}{1+k} \right)^i} \quad (2-34)$$

$$CNV = \frac{\sum_{t=1}^n C_i \left( \frac{1+l}{1+k} \right)^i}{\sum_{t=1}^n P_i \left( \frac{1+l}{1+k} \right)^i} \quad (2-35)$$

donde los ahorros económicos  $F_i$  se determinan con la diferencia entre los costos de producción  $C_i$  y el producto de los costos del agua en la localidad  $C_{m^3}^i$  en el año  $i$  y el volumen de permeado  $V_{per}^i$  en el año  $i$ . [

$$F_i = C_{m^3}^i * V_{per}^i - C_i \quad (2-36)$$



## 2.4. Optimización de sistemas de nanofiltración fotovoltaica.

La optimizado se determina cuando el parámetro maximice la eficiencia de remoción, el volumen de permeado, la razón de permeado, y minimice la energía específica y el plazo de recuperación.

En la Figura 2.13 se muestra la metodología de la optimización del sistema de nanofiltración, la cual se efectúa mediante análisis variacional, variando el área de captación y la presión de suministro. El análisis variacional se inicia identificando las variables independientes “X” y dependientes “Y” si la variable se encuentra en función de otra variable es dependiente como el caso del caudal, el permeado, la energía fotoeléctrica, entre otros. La variable independiente son las variables que no dependen de otras, que requieren de parámetros para dan un valor a la variable como es el caso del área de captación por la cantidad de módulos, la presión de suministro por el tipo, tamaño y potencia de la bomba y la resistencia total del solvente en la membrana.

El número de variables independientes  $n$  son modeladas incrementando o disminuyendo su valor un número de veces  $i$ . El método solo permite la variación de una sola variable, si existe más de una variable independiente la dependiente que no se encuentre en uso se mantiene constante. La variable independiente en uso cambia su valor hasta que los valores resultantes dependiente de la variable independiente  $X_{n,i}$  se consideren despreciables ( $\text{Residual} \leq 0.001$ ) respecto los valores de la variable anterior  $X_{n,i-1}$ . Las variables dependientes son graficadas en el eje de las “y” en función de la variable independiente en el eje de las “x”, permitiendo observar la sensibilidad de la variable independiente en el sistema. El punto que muestre un mejor desempeño en la eficiencia de remoción, el volumen de permeado, la razón de permeado y el menor desempeño de la energía específica y el plazo de recuperación.

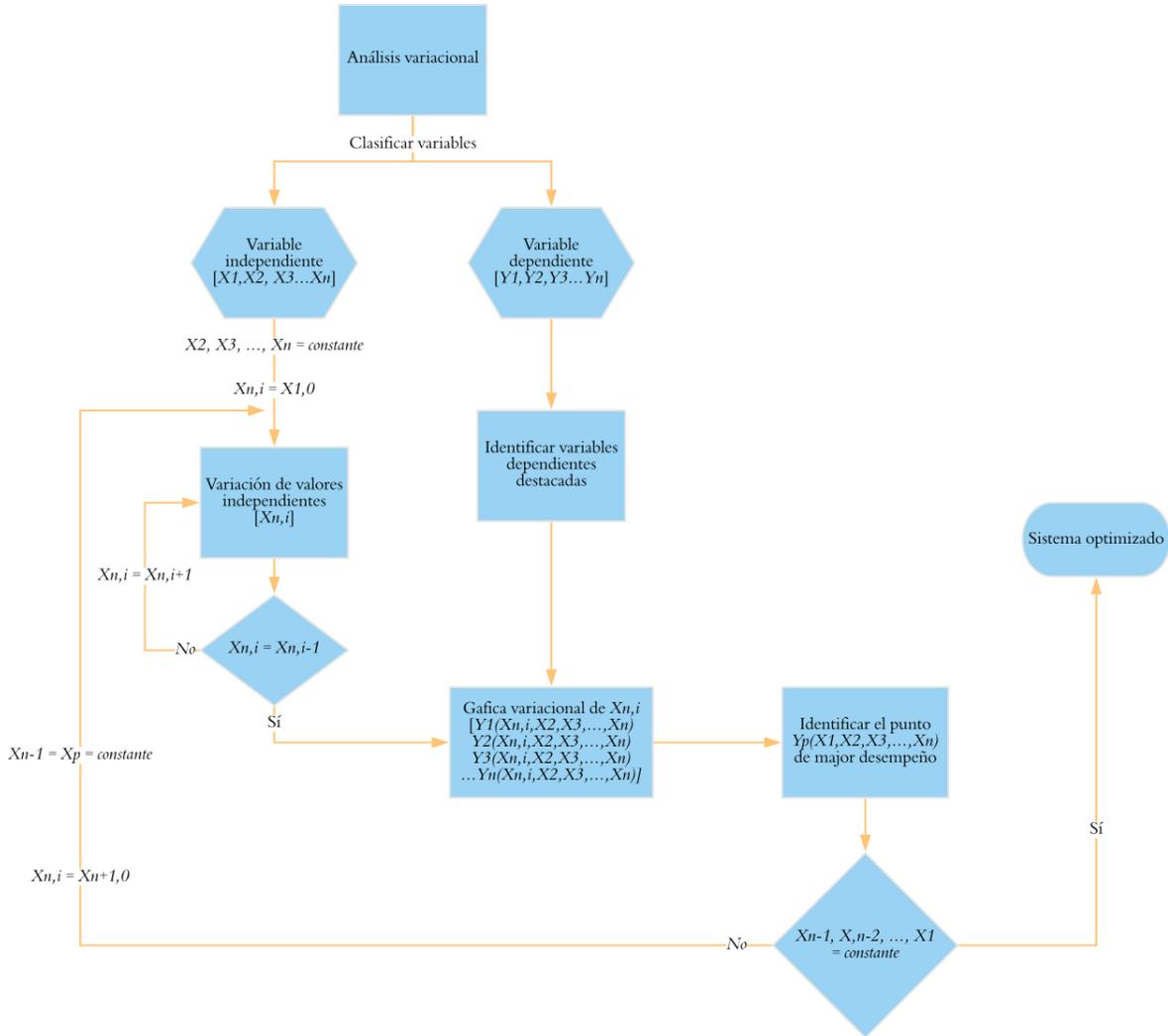


Figura 2.133 Metodología de optimización.

Para el estudio se seleccionaron dos variables independientes, el área de captación y la presión de suministro. Las variables dependientes empleadas en este estudio son la energía específica, razón de permeado, eficiencia de remoción, volumen de permeado, la tasa interna de retorno y el plazo de recuperación.

La primera variable independiente a variar fue el área de captación para suministrar 1400 W a la bomba para una presión constante 7 bar. El área de captación optimizada se mantiene constante para realizar un segundo análisis variacional para la presión de suministro.



## Capítulo 3 Plataforma de simulación

En este capítulo se presenta la elaboración de la plataforma de simulación mediante análisis por componentes, las metodologías empleadas para la construcción en TRNSYS.

### 3.1. Construcción de plataforma de simulación

El caudal de permeado, la eficiencia de remoción, la razón de permeado, el costo nivelado y el consumo energético se determinan a partir de la irradiación, la calidad del agua, las condiciones climáticas y de la evolución de los costos del agua. La modelación del sistema de nanofiltración fotovoltaica se realiza acoplando cuatro modelos, partiendo de las condiciones climáticas de datos meteorológicos de un año típico. Los datos meteorológicos de un año típico se obtuvieron de Meteonorm<sup>®</sup>, el modelo de Pérez determina la irradiación incidente en el plano inclinado de los módulos fotovoltaicos, el modelo de los cinco parámetros determina la potencia fotovoltaica, el modelo de Gherbi el caudal y presión hidráulica del sistema de bombeo, el modelo de concentración polarización el permeado y por último la tasa interna de retorno TIR, el costo nivelado CVN y el Payback PB. El acoplamiento de los modelos es en serie, donde las salidas de cada uno son las entradas del siguiente. Los parámetros de análisis económicos se estiman a partir de los costos de mercado actuales de los equipos y del agua en diferentes regiones. En la Figura 3.1 se muestra esquematiza la estrategia de simulación, la cual se codifica en TRNSYS<sup>®</sup> 18.

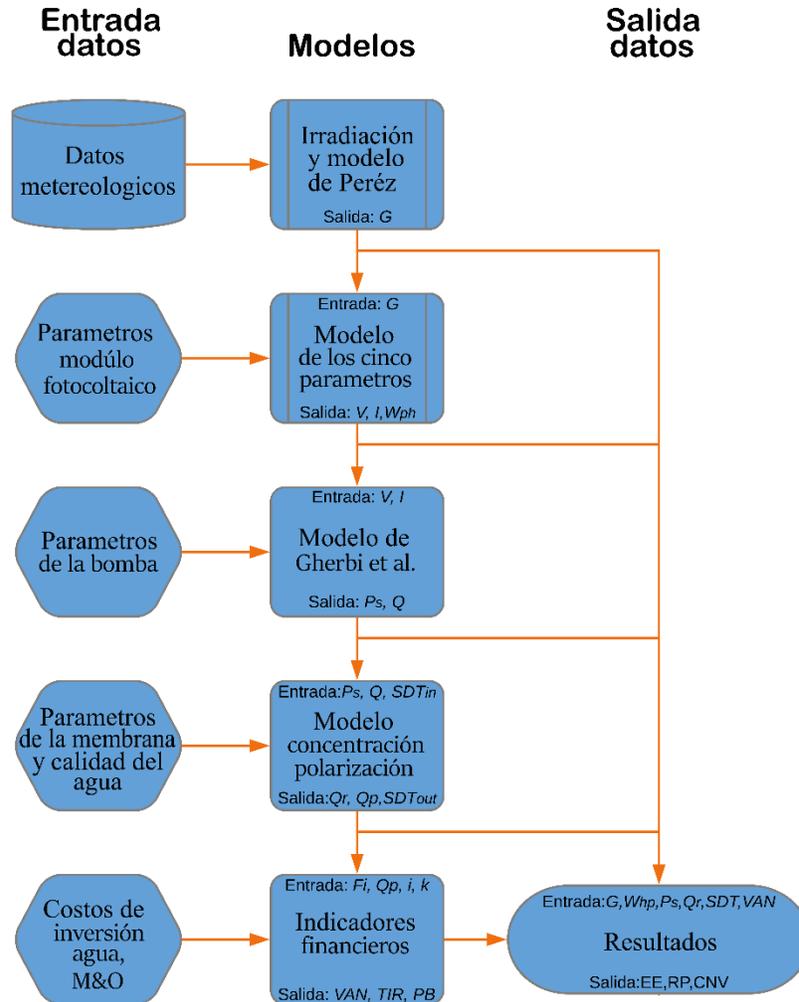


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la estrategia de simulación del sistema de nanofiltración.

### 3.1.1. Irradiación y Potencia Fotovoltaica

La irradiación se determina con una base de datos meteorológicos y el modelo de Pérez, empleando TRNSYS<sup>®</sup>. Las entradas son las coordenadas del lugar y la base de datos, y las salidas son la irradiación en pasos de tiempo. La inclinación del plano de captación se consideró a la latitud del lugar de estudio, con el fin de optimizar la irradiación anual. La irradiación que recibe el sistema se determina con la irradiancia en periodos anuales a pasos de tiempo integrada a cada hora. La irradiancia incidente en el plano de captación en el lugar de estudio se determina con la base de datos de Meteonorm<sup>®</sup>, con datos del año meteorológico típico (TMY) de cada 10 minutos y con el modelo de Pérez. En la Figura 3.2

se muestra el diagrama de flujo para obtener la irradiación incidente mediante datos meteorológicos.

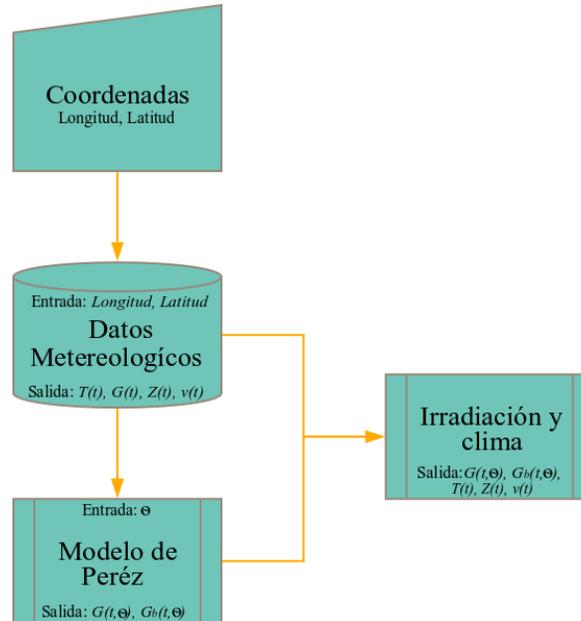


Figura 3.2 Diagrama de flujo de la plataforma de captación solar.

### Potencia fotovoltaica

La potencia fotovoltaica se determina empleado TRNSYS obteniendo el recurso solar de la simulación posterior y los parámetros característicos del módulo empleado. Las entradas son los parámetros del módulo, la radiación total incidente, la velocidad del viento, temperatura ambiente, ángulo zenit y radiación difusa en el paso del tiempo y las salidas son la potencia, la tensión y la corriente en pasos de tiempo. El módulo fotovoltaico se modela mediante el modelo de los cinco parámetros mencionado en el Capítulo 2 apartado 2.3.1, donde se determina la tensión y la corriente óptima del punto máximo de potencia, (MPPT por sus siglas en inglés) a partir de la radiación incidente. El módulo fotovoltaico empleado fue TSM-255-PC05A, del ANEXO 1 se obtienen la información requerida para la aplicación del modelo. La potencia fotovoltaica máxima se determina en periodos anuales a pasos de tiempo de un minuto que se integran en cada hora. En la Figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo para determinar la potencia fotovoltaica en términos generales.

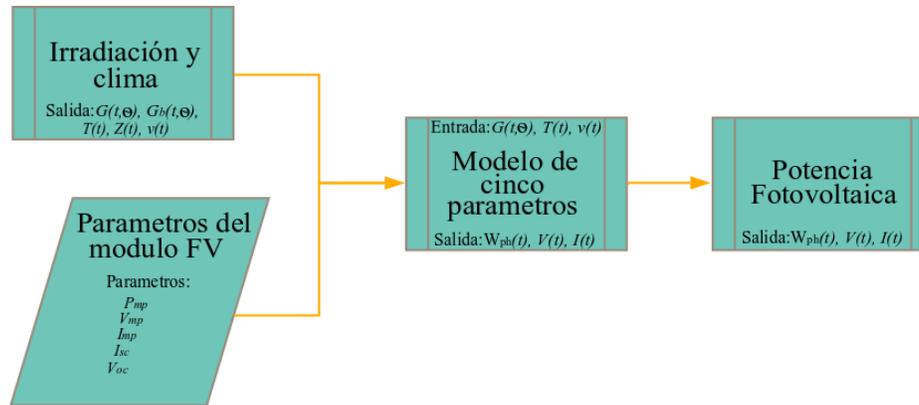


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación del sistema fotovoltaico.

### 3.1.2. Potencia hidráulica, caudal y presión de bombeo hidráulico

La potencia, el caudal y la presión se determinan con los resultados de la tensión y corriente partiendo de un código generado en TRNSYS. Las entradas son los parámetros de la bomba, la curva característica de la bomba, potencia fotovoltaica, tensión y la corriente, y las salidas son la potencia hidráulica, la presión y el caudal, todos los anteriores en pasos de tiempo. La simulación de la bomba se hace mediante el método de Gherbi mencionado en la Capítulo 2 apartado 2.3.2 que permite realizar un ajuste del caudal de acuerdo la potencia, caudal y eficiencia de la bomba de acuerdo a su curva característica y sus características de operación. La bomba empleada para la simulación fue una bomba Grunfos 16 SQF-10, empleando la curva característica del ANEXO 2, se determina la ecuación. La potencia hidráulica, caudal y presión se determinan en periodos anuales a pasos de tiempo de un minuto integrados en cada hora. En la Figura 3.4 se presenta el diagrama de flujo para determinar la potencia hidráulica caudal y presión mediante el método de Gherbi.

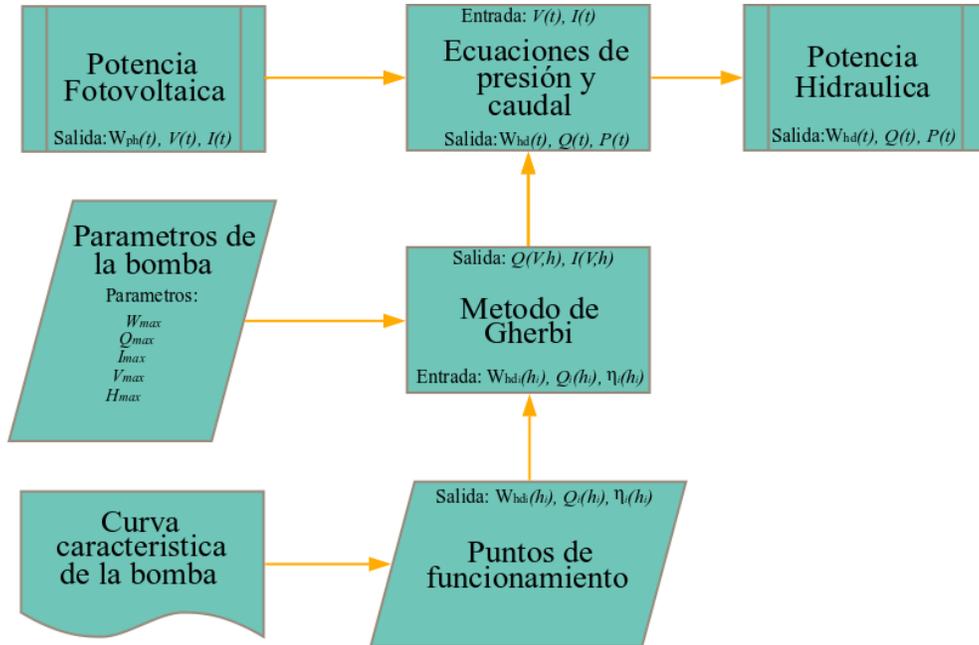


Figura 3.4 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación hidráulica.

### 3.1.3. Separación de especies

Los sólidos totales disueltos, caudales de permeado y rechazo se determinan con los resultados de la presión y caudal desarrollando el código propio en TRNSYS. Las entradas son los parámetros de la membrana, la calidad y temperatura del agua, el caudal y la presión suministrada. Las salidas son la calidad y caudal del permeado en lapsos de tiempo de un minuto. La separación de especies se modela mediante el modelo de concentración polarización mencionado en el Capítulo 2 apartado 2.3.3, que implica conocer la resistencia del medio solvente, y la diferencia de presión osmótica generada, cumpliendo con las ecuaciones de conservación de masa. La membrana empleada fue de poliamida modelo ESNA-LF-4040 mostrada en el ANEXO 3, donde se obtuvieron los datos del desempeño de la membrana. La calidad del agua, el caudal de permeado y rechazo se determinan en periodos anuales a pasos de tiempo, los caudales son integrados por hora, mientras que la calidad se promedia entre los datos de cada aparición. En la Figura 3.5 se presenta en términos generales la estrategia de simulación de especies.

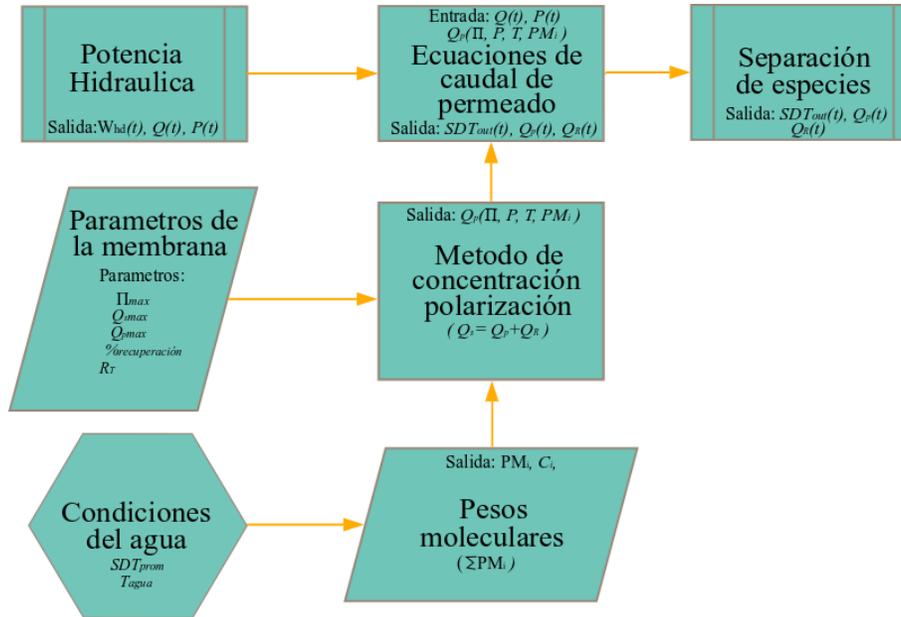


Figura 3.5 Diagrama de flujo de la plataforma de simulación de la separación.

### 3.1.4. Indicadores financieros

La tasa interna de retorno TIR, el tiempo de retorno PB, y el costo nivelado CNV, se determinan con los costos de inversión, mantenimiento, operación, volumen de agua permeado promedio anual, el costo del agua de la localidad, la tasa de descuento anual y la tasa de inflación anual. El método fue mediante ahorros de ciclo de vida. Las entradas son los costos de inversión y mantenimiento, la tasa de inflación y la de descuento, el permeado anual, el costo del agua en la ubicación. Las salidas son la TIR, el PB y los CNV. Los costos del sistema se determinan considerando las ecuaciones mencionadas en el Capítulo 2 sección 2.3.4. Los costos del agua se obtienen del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), los costos de equipo, mantenimiento, proveedores, la tasa de inflación y la tasa de descuento, del Banco Nacional de México (BANXICO). [13, 49] La evolución de los costos de agua se estima con regresiones lineales, y se aplican las ecuaciones de los indicadores financieros VAN, TIR, PB y CNV. En la Figura 3.6 se muestra el diagrama de flujo para determinar los indicadores financieros.

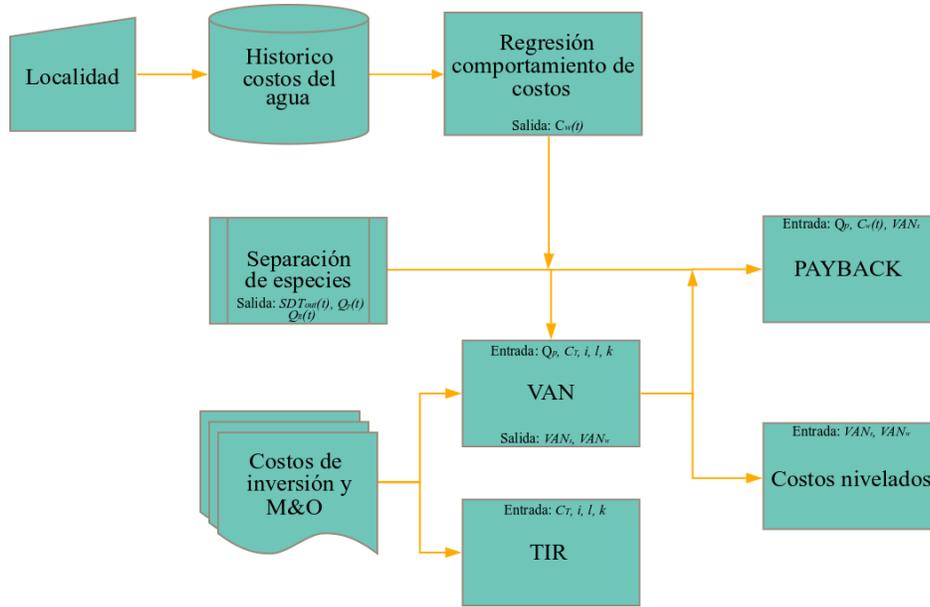


Figura 3.6 Diagrama de flujo de los indicadores financieros.

## 3.2.Verificación de plataforma

La plataforma se verifica comparando las salidas de cada componente con las reportadas en trabajos previos, del Grupo del Banco Mundial WBG (2017) [11], Herold & Neskakis (2001) [50], Carrillo *et al.* (2015) [29], de la herramienta de simulación WAVE de DOW y Flores-Prieto *et al.* (2015) [10]

En la Figura 3.7 se muestra la metodología empleada para la verificación de la herramienta. La verificación consiste en comparar los resultados de cada modelo empleado con lo reportado en la literatura. La comparación emplea el error porcentual medio absoluto (MAPE) cuando este sea menor al 10.00% la herramienta es adecuada según Geraldés & Brites (2008) [26] y Wang *et al.* (2012) [33]. Los modelos son validados uno por uno en orden de su ejecución en la herramienta. Es decir, si el Modelo 1 cumple con la condición se valida el Modelo 2, y así sucesivamente hasta el último Modelo n. Si el modelo no cumple con la condición se revisa el modelo, se repite la simulación y se compara nuevamente hasta cumplirla. Cuando el último modelo es validado se pasa a comparar el comportamiento de los modelos en conjunto, si esta cumple la condición la herramienta es adecuada, en caso contrario se revisa el componente que obtuvo mayor desviación, se revisa, se corrige, se simula y se compara nuevamente.

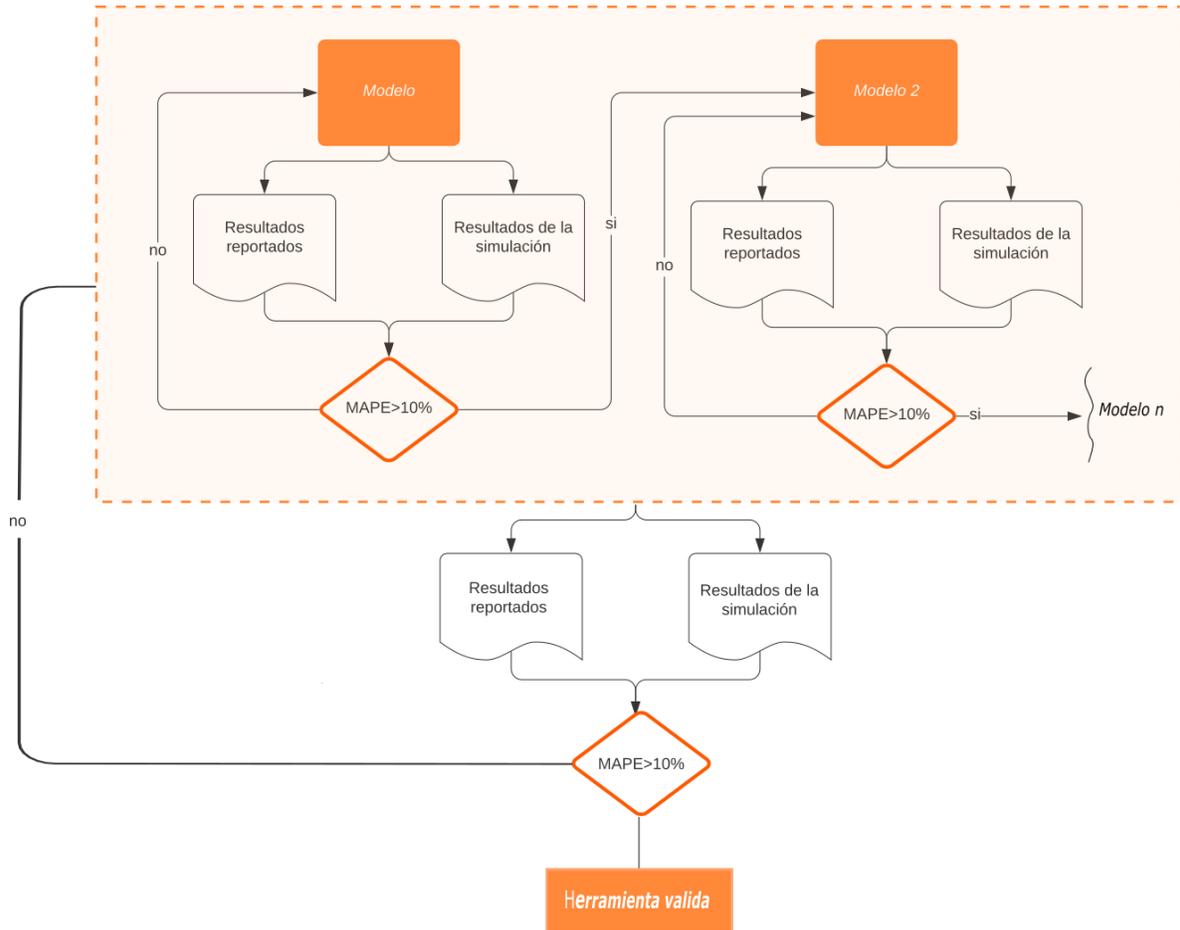


Figura 3.7 Metodología de validación

Los modelos a validados en este estudio son el recurso solar, el recurso fotovoltaico, el bombeo fotovoltaico y la separación de especies uno por uno. El recurso solar compara la irradiación horizontal global determinada por modelo emprendo los datos de Meteonorm<sup>®</sup>, con lo reportado por Grupo del Banco Mundial WBG (2017) [11] en las zonas de Rio Verde y Pozo Izquierdo, Herold & Neskakis (2001) [50], en Pozo Izquierdo y Flores-Prieto *et al.* (2015) [10] en Rio Verde presentando desviaciones de 0.82%, 1.63%, 0.99% y 12.22% respetivamente. El MAPE promedio para determinar el recurso solar fue de 3.10%, considerándose adecuado para la simulación.

El recurso fotovoltaico se compara la energía fotovoltaica promedio diaria simulada por el sistema respecto a los resultados del Grupo del Banco Mundial WBG (2017) [11] y Herold

& Neskakis (2001) [50], en Pozo Izquierdo a mismas condiciones, las desviaciones resultantes fueron de 2.35% y 9.84% respectivamente. La desviación promedio para el recurso fotovoltaico fue de 6.09%, encontrándose dentro de los estándares establecidos, por lo cual se considera adecuado.

El bombeo fotovoltaico se compara el volumen de agua promedio diaria simulada con lo reportado Carrillo *et al.* (2015) [29] a mismas condiciones, obteniendo una desviación de 5.28% dentro del rango establecido para determinar que la herramienta es adecuada.

La nanofiltración se compara el permeado y la concentración resultante, con la herramienta comercial de DOW “WAVE” a mismas condiciones presentando diferencias de 0.52% y 5.03% respectivamente. La desviación promedio del modelo fue de 2.91% considerándose adecuada para la simulación.

La simulación acoplada se compara con lo reportado por Flores-Prieto *et al.* (2015) [10] para la cuenca de Rio Verde. Los datos comparados fueron la presión de suministro, el permeado promedio diario, el consumo energético y el contenido de SDT, obteniendo desviaciones de 4.08%, 12.50%, 2.50% y 3.61% respectivamente. En conjunto el modelo tiene una desviación promedio global de 5.74%.

En la Tabla 3.1 se muestra el MAPE resultante de cada componente de la herramienta y de la herramienta completamente integrada. Se puede observar que las desviaciones resultantes son aceptables, por lo que, la herramienta puede ser aplicada para la simulación de un sistema NF-FV-BP.

Tabla 3.1 Verificación de la plataforma de simulación

Componente	Referencia de comparación	MAPE
NF-FV-BP	Flores-Prieto <i>et al.</i> (2015)	5.74%
Nanofiltración	WAVE	2.91%
Bombeo fotovoltaico	Carrillo <i>et al.</i> (2015)	5.28%
Recurso fotovoltaico	WBG, Herold & Neskakis (2001)	6.09%
Radiación	WBG, Herold & Neskakis (2001), Flores-Prieto <i>et al.</i> (2015)	3.10%



## Capítulo 4 Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la simulación energética y económica del sistema de nanofiltración fotovoltaica para Manuel Doblado, Guanajuato, que se localiza en la región hidrológica-administrativa (RHA) número VIII Lerma-Santiago-Pacífico en la cuenca de La Tinaja en el pozo del ejido la calzada.

El estudio consiste en evaluar energéticamente y económicamente un diseño de sistema propuesto de  $3 \text{ m}^3/\text{día}$  trabajando con energía solar fotovoltaica. En los resultados de la simulación energética se presentan; el consumo energético, la eficiencia del sistema, el volumen suministro y de permeado, la razón de permeado, la calidad del agua en términos de  $\text{mg/l}$  y la energía específica. En lo que respecta a los resultados de la modelación económica se obtienen; el costo nivelado, el TIR y el PB. El costo nivelado del agua se compara respecto a las tarifas de agua en la localidad determinando la viabilidad del sistema. La simulación energética permitió en una primera etapa, la optimización del sistema con un estudio de variación de parámetros, donde se consideró el área y la presión. En una segunda etapa, la optimización económica por el mismo método permitió optimizar los costos nivelados, la TIR y el tiempo de retorno.

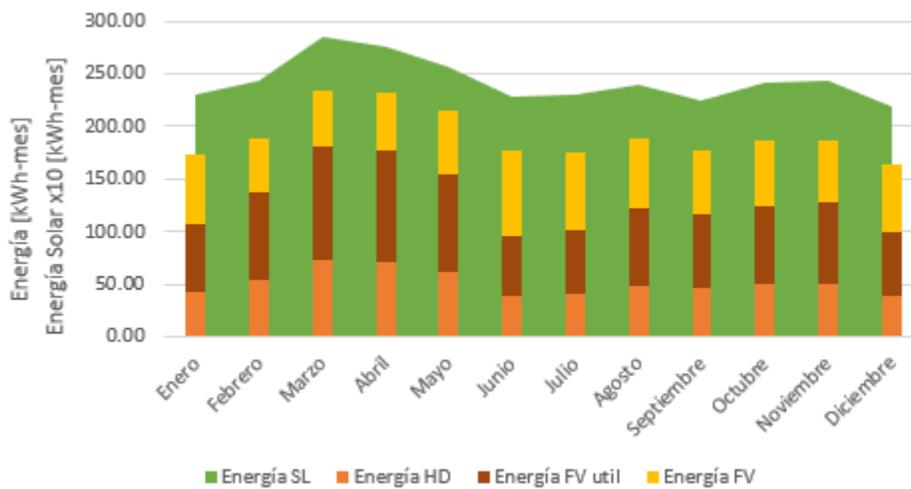
### 4.1. Resultados simulación energética

La eficiencia energética del sistema simula el volumen de permeado, la razón de permeado, la calidad del agua en términos de  $\text{mg/l}$  y la energía específica. Estos parámetros son los indicadores de optimización del sistema. La simulación se realiza en periodo anual donde se desea obtener la energía solar, la energía producida por el módulo, la energía útil y la energía hidráulica.

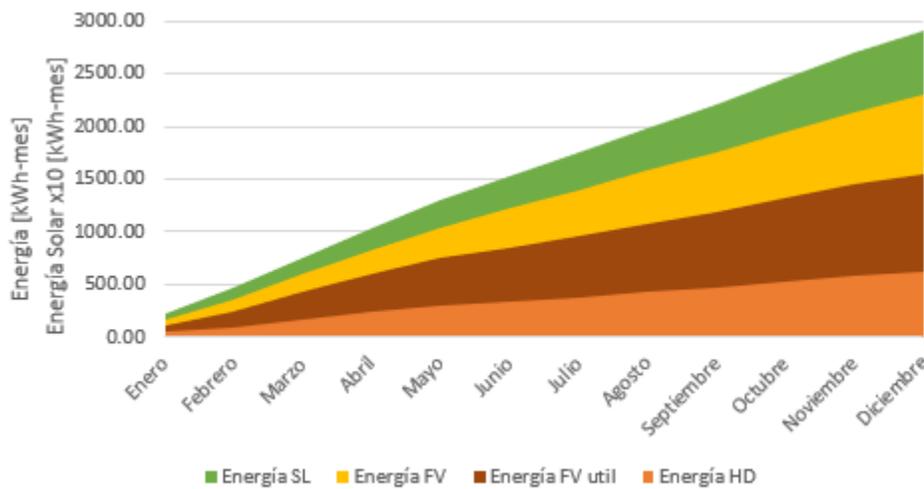
En la Figura 4.1 se muestra el desempeño del sistema en capacidad de energía incidente solar (SL), la energía fotoeléctrica (FV) generada, la energía útil y la energía hidráulica (HD) de suministro. Se puede apreciar que las energías tienen un comportamiento similar al de la irradiación por lo que los resultados obtenidos son congruentes a su suministro. El sistema mostró mayor desempeño en el mes de marzo con  $2854.78 \text{ kWh-mes}$  de energía solar

incidente produciendo energía fotovoltaica de 233.24 kWh-mes, una energía útil de 181.54 kWh-mes y una energía hidráulica de 72.61 kWh-mes.

La eficiencia promedio total de sistema de nanofiltración es de 2.12%, respecto radiación incidente en el área de captación. La eficiencia de producción energética del módulo respecto a la radiación incidente es de 7.17%. La energía generada produce desperdicio, por falta o exceso de energía desecha 32.75 % teniendo una energía útil de 67.25 %. La bomba aprovecha la energía útil al 40.00 %.



a) Producción energética promedio mensual



b) Producción energética totalizada

Figura 4.1 Producción energética a) promedio mensual, b) totalizada.

En la Figura 4.2 se muestra el comportamiento de volumen de suministro y volumen de permeado promedio mensual del sistema en Manuel Doblado, donde el rechazo en el espacio existente entre el permeado y el suministro se puede apreciar que el permeado, presenta un comportamiento casi lineal por lo que se podría concluir que permeado alcanzó su máxima capacidad para la membrana seleccionada. Por otro lado, el caudal de suministro presenta un comportamiento similar a la irradiación de la Figura 4.1. En la Figura se aprecia que la razón de permeado es mayor en el mes de marzo alcanzando un volumen de permeado de  $155.22 \text{ m}^3\text{-mes}$  con un suministro de  $523.97 \text{ m}^3\text{-mes}$  teniendo como resultado un rechazo de  $368.75 \text{ m}^3\text{-mes}$  otorgando una razón de permeado de  $3/7$ . La razón de permeado promedio diario es de  $4/9$  es decir que el sistema por cada  $4 \text{ m}^3$  de permeado el sistema rechaza  $9 \text{ m}^3$ .

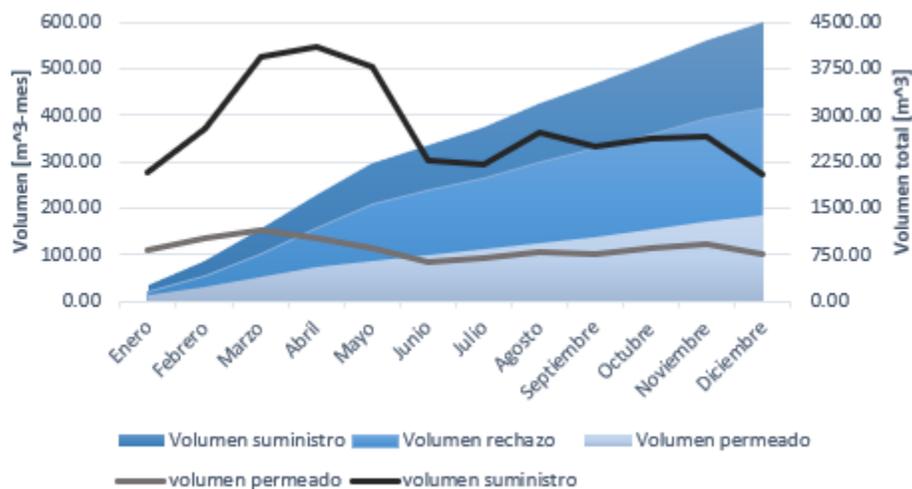


Figura 4.2 Volumen de suministro, permeado y rechazo.

En la Tabla 4.1. se muestran los parámetros del sistema la calidad de permeado, eficiencia de remoción, razón de permeado, y el consumo energético logrados por el sistema NF-FV-BP en Manuel Doblado. La salinidad del permeado promedio anual fue de  $1375.15 \text{ mg/l}$  con una eficiencia de remoción de  $65.33\%$  una razón de permeado fue de  $4/9$  con un consumo energético de  $1.66 \text{ kWh/m}^3$ .



Tabla 4.1 Parámetros de la nanofiltración fotovoltáica

Parámetro	Resultados
Salinidad del permeado	1375.14 mg/l
Eficiencia de remoción	65.33%
Razón de permeado	4/9
Energía específica	1.66 kWh/m <sup>3</sup>

El agua cruda pasó de la categoría de muy salina de 3966 mg/l a un permeado moderadamente salino 1375.14 mg/l, permitiendo su uso para algunos productos agrícolas como lo son el algodón, el sésamo, el sorgo, la coliflor y el girasol de acuerdo al departamento de desarrollo regional e industrias primarias del gobierno de Australia [51].

En los resultados se observa que la nanofiltración fotovoltáica a baja presión cumple con las características energéticas, de acuerdo con [3, 8, 15, 18, 20, 34], con un consumo energético de 1.66 kWh/m<sup>3</sup>.

## 4.2. Resultados de la simulación económica

La modelación económica determinó la competitividad de la nanofiltración mediante los costos nivelados del agua, la Taza Interna de Retorno (TIR) y el plazo de recuperación (PB). La competitividad económica se alcanza cuando se compara los costos nivelados con las tarifas de agua en la localidad, cuando el costo nivelado sea menor a la tarifa más viable es el sistema. En la Figura 4.3 se muestra el comparativo de los costos del agua para tarifa industrial, comercial y doméstica respecto al costo nivelado del sistema de nanofiltración en Manuel Doblado. El costo nivelado es de \$35.77 MXN/m<sup>3</sup>. El costo nivelado en esa región es superior al agua comercial de \$ 28.26 MXN/m<sup>3</sup> y doméstica de \$ 23.89 MXN/m<sup>3</sup>, pero, es inferior a la tarifa industrial de \$ 65.00 MXN/m<sup>3</sup>.

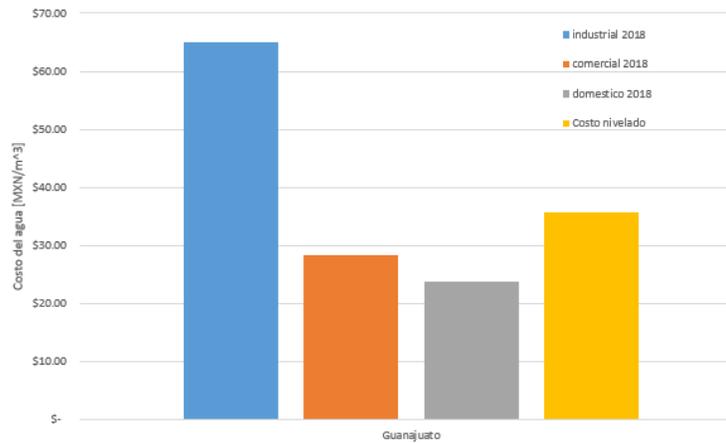


Figura 4.3 Costos del agua en Manuel Doblado

En la Figura 4.4 se presenta el punto de equilibrio operativo del proyecto a lo largo de su vida útil contemplando los ahorros anuales y el incremento de la tarifa industrial, comercial y domestica con un costo inicial es de \$ 111,066.98 *MXN*. Los con ahorros promedio anuales a tarifa industrial fueron de \$ 77,792.42 *MXN* llegando al equilibrio o PB a los 1.34 años a una TIR de 82.89% y un VPN de \$ 1,366,988.95 *MXN*. La tarifa comercial contemplo ahorros promedio anuales de \$ 24,994.60 *MXN* llegando al equilibrio o PB a los 5 años, a una TIR de 29.60% y un VPN de \$ 18,763.82 *MXN*. La tarifa doméstica presento ahorros promedio anuales de \$ 18,392.86 *MXN* llegando al equilibrio o PB a los 6.77 años, a una TIR de 22.79% y un VPN de \$ 12,294.86 *MXN*.

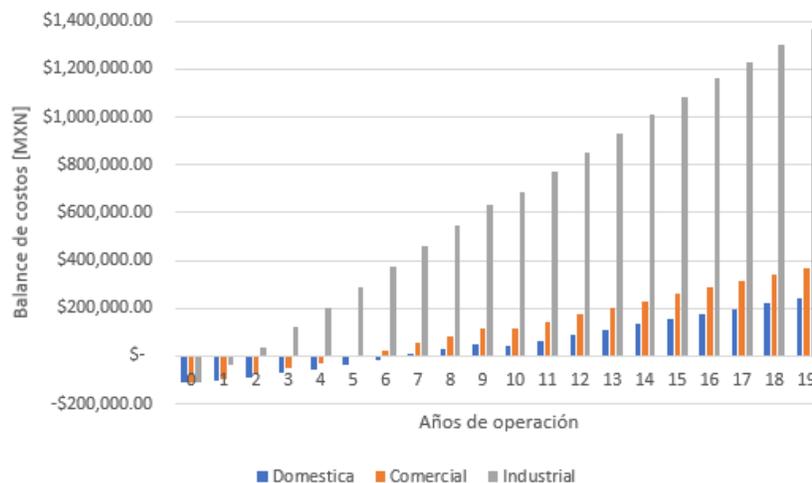


Figura 4.4 Punto de equilibrio operativo en tarifa industrial

### 4.3. Optimización del sistema

En la optimización del sistema se determinó el área de captación fotovoltaica que provee el volumen de permeado requerido, considerando la TIR, la energía específica, la eficiencia de remoción, el plazo de recuperación, el volumen de permeado y la razón de permeado. La optimización en los costos se considera tarifa industrial.

En la Figura 4.5 se muestra el análisis variacional del área de captación, donde se puede apreciar que el sistema no opera hasta tener un área de captación de  $9.84 \text{ m}^2$  o mayor. Al incrementar el área de captación la eficiencia de remoción se mantiene constante, la energía específica y el plazo de recuperación incrementa, y la razón de permeado, la TIR y el permeado disminuyen. El área de  $13.12 \text{ m}^2$  presentó el mayor desempeño en términos de volumen de permeado promedio diario, razón de permeado, permeado y TIR, siendo el tope de los parámetros antes mencionados. En áreas superiores a  $18.04 \text{ m}^2$  la viabilidad del sistema decae considerablemente, ya que supera los  $5 \text{ kWh/m}^2$  en donde se considera que no es viable el sistema por su plazo de recuperación.

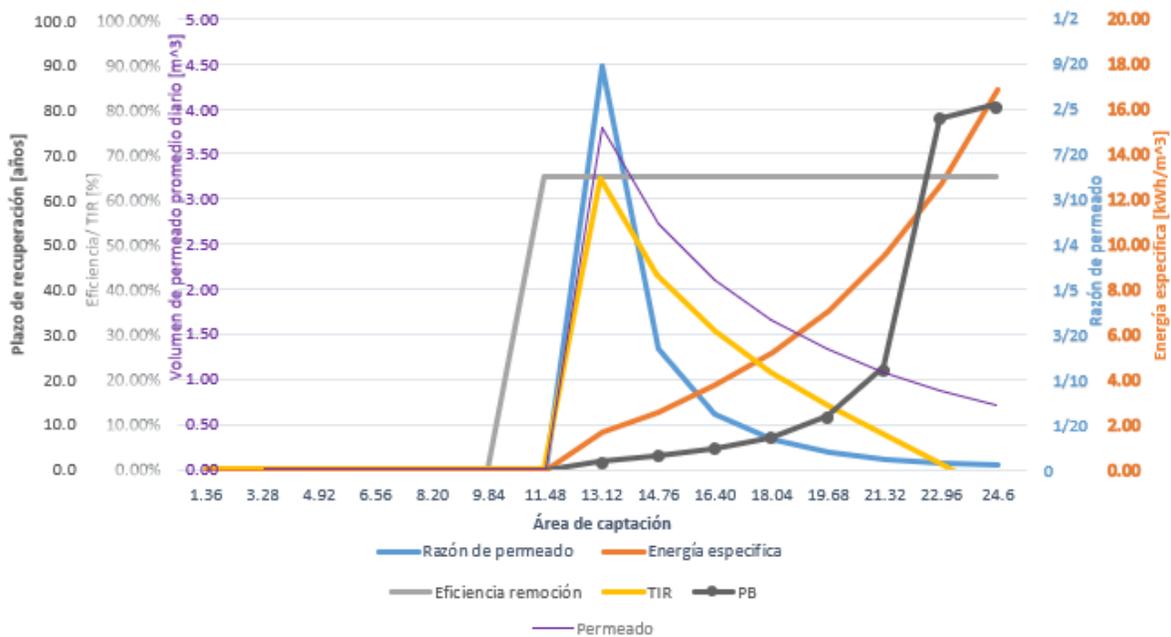


Figura 4.5 Análisis variacional del área de captación

En la Figura 4.6 se muestra el análisis variacional de la presión de suministro donde se puede apreciar que al incrementar la presión de suministro la eficiencia de remoción, la energía específica y el plazo de recuperación disminuyen, mientras que para la razón de permealdo incrementa hasta un pico a 14.08 *bar* y desciende abruptamente al incrementar la presión de suministro, al igual que la eficiencia de remoción. La presión óptima de trabajo se presenta cuando la bomba trabaja alrededor de 14.08 *bar* proporcionando la mayor razón de permealdo 9/20, la menor energía específica de 1.8 *kWh/m<sup>2</sup>* y el menor plazo de recuperación de dos años con una eficiencia de remoción aceptable de 65.32 %.

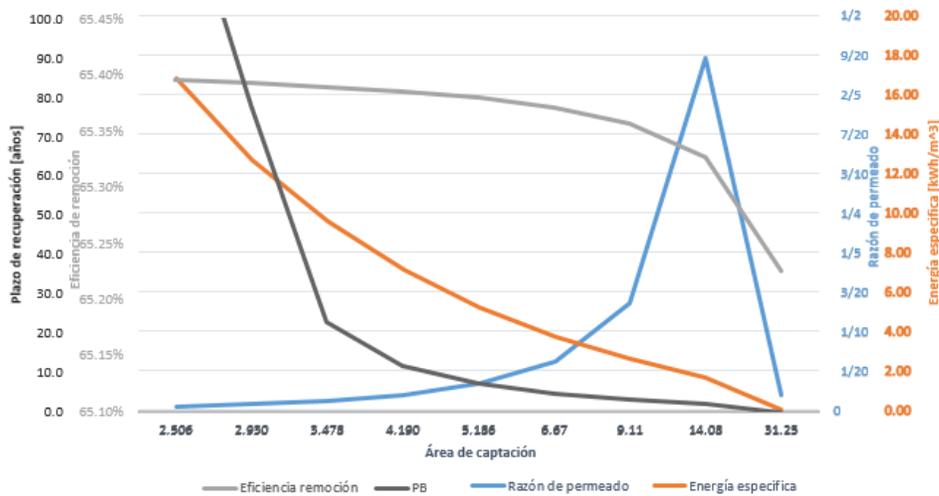


Figura 4.6 Análisis variacional de presión de suministro



## Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se muestran las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

### 5.1. Conclusiones

La nanofiltración fotovoltaica es una tecnología que en la actualidad puede sustituir la osmosis inversa superando el permeado en un 20-30% en las mismas condiciones. La competitividad de la tecnología está ligada a no emplear baterías, ya que estas aumentan los costos afectando directamente el PB, TIR y el CNV. La calidad de la nanofiltración es limitada para aplicaciones de baja o media salinidad.

El agua salitrosa ingresó con 3966 mg/l y el permeado presentó una calidad de 1374.14 mg/l, suficiente para cultivos con moderada y elevada tolerancia a la salinidad, como lo son el sorgo, girasol, sésamo entre otros. Es de observar que uno de los productos agrícolas más importantes de la zona de estudio es el sorgo, por lo que el agua tratada es una alternativa considerable para los productores del campo de Manuel Doblado, Gto.

El sistema de NF-FV-BP en Manuel Doblado tiene la capacidad de remover el 65.33% de la salinidad, con una relación de permeado de 4/9 con un consumo energético de 1.66 kWh/m<sup>3</sup>. El sistema de NF-FV-BP es viable en términos del consumo energético, debido a que se encuentra dentro de lo reportado en la literatura.

El costo nivelado de la nanofiltración en Manuel Doblado resultó de \$ 24.33 MXN más barato que emplear agua a tarifa industrial. En términos del costo nivelado no es viable para tarifa doméstica o comercial.

La capacidad económica en Manuel Doblado considerando el incremento de los costos del agua en cada tarifa los sistemas pueden otorgar al menos dos veces el ahorro cantidad de la inversión inicial a lo largo de la vida útil del sistema.



El sistema de nanofiltración fotovoltaica con una bomba de 1400W opera hasta obtener un área de captación superior a los 9.84 m<sup>2</sup>. El área de captación óptima para las características propuestas en el trabajo fue de 13.12 m<sup>2</sup>, alrededor de 6 a 7 para módulos fotovoltaicos de 255W. La presión óptima de alimentación del sistema es de 14.08 *bar* si esta disminuye o incrementa reduce la eficiencia del sistema.

## 5.2. Recomendaciones para trabajos futuros

Las recomendaciones para trabajos futuros son:

- Realizar un mapeo de las zonas potenciales para la NF-FV-BP en la república mexicana.
- Evaluar el desempeño de la herramienta empleando otras membranas.
- Evaluar la posibilidad de utilizar otras tecnologías de módulos fotovoltaicos.
- Establecer un uso para el agua de rechazo de la nanofiltración.
- Determinar en términos exegéticos la viabilidad de la nanofiltración fotovoltaica

## Referencias

- [1] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), “The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Job.,” 2016.
- [2] WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), “The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions.,” Paris, 2018. [Online]. Available: [http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2018-nature-based-solutions/?utm\\_source=IWA-NETWORK&utm\\_campaign=225734ad48-EMAIL\\_CAMPAIGN\\_2018\\_03\\_15&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_c457ab9803-225734ad48-158989237](http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2018-nature-based-solutions/?utm_source=IWA-NETWORK&utm_campaign=225734ad48-EMAIL_CAMPAIGN_2018_03_15&utm_medium=email&utm_term=0_c457ab9803-225734ad48-158989237).
- [3] H. Sharon and K. S. Reddy, “A review of solar energy driven desalination technologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1080–1118, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.002.
- [4] A. W. Mohammad, Y. H. Teow, W. L. Ang, Y. T. Chung, D. L. Oatley-Radcliffe, and N. Hilal, “Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects,” *Desalination*, vol. 356, pp. 226–254, 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.10.043.
- [5] C. Li, Y. Goswami, and E. Stefanakos, “Solar assisted sea water desalination: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 19, pp. 136–163, Mar. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2012.04.059.
- [6] S. M. Shalaby, “Reverse osmosis desalination powered by photovoltaic and solar Rankine cycle power systems: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. March 2017, pp. 789–797, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.170.
- [7] A. M. Bilton, L. C. Kelley, and S. Dubowsky, “Photovoltaic reverse osmosis — Feasibility and a pathway to develop technology,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 31, no. 1–3, pp. 24–34, 2011, doi: 10.5004/dwt.2011.2398.
- [8] O. Labban, C. Liu, T. H. Chong, and J. H. Lienhard V, “Fundamentals of low-pressure nanofiltration: Membrane characterization, modeling, and understanding the multi-ionic interactions in water softening,” *J. Memb. Sci.*, vol. 521, pp. 18–32, 2017, doi: 10.1016/j.memsci.2016.08.062.
- [9] K. D’Costa, “Seawater sulfate removal with nanofiltration,” *Filtr. Sep.*, vol. 52, no. 2, pp. 22–24, 2015, doi: 10.1016/S0015-1882(15)30089-6.
- [10] J. J. Flores-Prieto, J. J. Ramírez-Luna, C. Calderón-Mólgora, E. Delgado-Quezada, and A. De Jesús Morales-García, “Tratamiento de agua salobre mediante nanofiltración solar a baja presión para irrigación,” *Tecnol. y Ciencias del Agua*, vol. 6, no. 6, pp. 5–17, 2015.
- [11] The World Bank Group, “Global Solar Atlas.” <https://globalsolaratlas.info/?c=16.804541,-93.164063,3&s=26.273714,-110.566406&m=sg:ghi> (accessed Feb. 15, 2019).
- [12] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Comisión Nacional del Agua, “Estadísticas del Agua en México, Edición 2016,” p. 282, 2016, doi: 978-968-817-895-9.
- [13] CONAGUA, “Sistema Nacional de Información del Agua,” *Comisión Nacional del Agua*, 2018. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php> (accessed Feb. 13, 2019).
- [14] D. Kirchem, M. Lynch, V. Bertsch, and E. Casey, “Modelling demand response with



- process models and energy systems models: Potential applications for wastewater treatment within the energy-water nexus,” *Applied Energy*. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114321.
- [15] N. Voutchkov, “Energy use for membrane seawater desalination - current status and trends,” *Desalination*, vol. 431, no. September 2017, pp. 2–14, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.10.033.
- [16] L. Feng and B. Chen, “Energy-water Nexus of Wastewater Treatment System: Conceptual Model and Framework,” in *Energy Procedia*, vol. 104, pp. 141–145, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.025.
- [17] M. A. Alghoul, P. Poovanaesvaran, M. H. Mohammed, A. M. Fadhil, A. F. Muftah, M. M. Alkilani, K. Sopian, “Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system,” *Renew. Energy*, vol. 93, pp. 101–114, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.02.015.
- [18] A. Alshegri, S. A. Sharief, S. Rabbani, and N. Z. Aitzhan, “Design and Cost Analysis of a Solar Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant for Masdar Institute,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 319–324, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.365.
- [19] G. Franchini and A. Perdichizzi, “Modeling of a Solar Driven HD (Humidification-Dehumidification) Desalination System,” *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 588–597, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.063.
- [20] H. J. Oh, T. M. Hwang, and S. Lee, “A simplified simulation model of RO systems for seawater desalination,” *Desalination*, vol. 238, no. 1–3, pp. 128–139, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.01.043.
- [21] D. B. Riffel and P. C. M. Carvalho, “Small-scale photovoltaic-powered reverse osmosis plant without batteries: Design and simulation,” *Desalination*, vol. 247, no. 1–3, pp. 378–389, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.07.019.
- [22] P. Marchetti and A. G. Livingston, “Predictive membrane transport models for Organic Solvent Nanofiltration: How complex do we need to be?,” *J. Memb. Sci.*, vol. 476, pp. 530–553, 2015, doi: 10.1016/j.memsci.2014.10.030.
- [23] N. García-Martín, V. Silva, F. J. Carmona, L. Palacio, A. Hernández, and P. Prádanos, “Pore size analysis from retention of neutral solutes through nanofiltration membranes. The contribution of concentration-polarization,” *Desalination*, vol. 344, pp. 1–11, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2014.02.038.
- [24] D. Fierro, A. Boschetti-de-Fierro, and V. Abetz, “The solution-diffusion with imperfections model as a method to understand organic solvent nanofiltration of multicomponent systems,” *J. Memb. Sci.*, vol. 413–414, pp. 91–101, 2012, doi: 10.1016/j.memsci.2012.04.027.
- [25] G. M. Geise, H. B. Park, A. C. Sagle, B. D. Freeman, and J. E. McGrath, “Water permeability and water/salt selectivity tradeoff in polymers for desalination,” *J. Memb. Sci.*, vol. 369, no. 1–2, pp. 130–138, 2011, doi: 10.1016/j.memsci.2010.11.054.
- [26] V. Geraldes and A. M. Brites Alves, “Computer program for simulation of mass transport in nanofiltration membranes,” *J. Memb. Sci.*, vol. 321, no. 2, pp. 172–182, 2008, doi: 10.1016/j.memsci.2008.04.054.
- [27] J. G. Wijmans and R. W. Baker, “The solution-diffusion model : a review,” vol. 107, pp. 1–21, 1995, doi: 10.1016/0376-7388(95)00102-I.
- [28] A. Djoudi Gherbi, A. Hadj Arab, and H. Salhi, “Improvement and validation of PV motor-pump model for PV pumping system performance analysis,” *Sol. Energy*, vol.



- 144, pp. 310–320, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2016.12.042.
- [29] J. M. Carrillo, L. M. Carrasco, F. Martínez-Moreno, and L. Navarte, “Modeling and Simulation of Large Pv Pumping Systems,” no. 1, pp. 2925–2928, 2015, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-6BV.5.42.
- [30] A. Oi, “Modeling and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System Modeling and Simulation of Photovoltaic Water Pumping System,” no. June, pp. 1–7, 2009, doi: 10.1109/AMS.2009.85.
- [31] M. A. Abdel-Fatah, “Nanofiltration systems and applications in wastewater treatment: Review article,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 3077–3092, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2018.08.001.
- [32] Y. Roy, D. M. Warsinger, and J. H. Lienhard, “Effect of temperature on ion transport in nanofiltration membranes: Diffusion, convection and electromigration,” *Desalination*, vol. 420, no. March, pp. 241–257, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.07.020.
- [33] R. Wang, Y. Li, J. Wang, G. You, C. Cai, and B. H. Chen, “Modeling the permeate flux and rejection of nanofiltration membrane separation with high concentration uncharged aqueous solutions,” *Desalination*, vol. 299, pp. 44–49, 2012, doi: 10.1016/j.desal.2012.05.014.
- [34] P. Y. Pontalier, A. Ismail, and M. Ghoul, “Specific model for nanofiltration,” *J. Food Eng.*, vol. 40, no. 3, pp. 145–151, 1999, doi: 10.1016/S0260-8774(99)00041-2.
- [35] M. Amine, L. Atik, G. Bachir, and M. Aillerie, “Photovoltaic panels characterization and experimental testing,” *Energy Procedia*, vol. 119, pp. 945–952, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.127.
- [36] M. T. Boyd, S. A. Klein, D. T. Reindl, and B. P. Dougherty, “Evaluation and Validation of Equivalent Circuit Photovoltaic Solar Cell Performance Models,” *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 133, no. 2, p. 021005, 2011, doi: 10.1115/1.4003584.
- [37] M. Villalva, J. Gazoli, and E. Filho, “Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009, doi: 10.1109/tpel.2009.2013862.
- [38] D. Zarzo and D. Prats, “Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future?,” *Desalination*, vol. 427, no. October 2017, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.10.046.
- [39] J. H. Reif and W. Alhalabi, “Solar-thermal powered desalination: Its significant challenges and potential,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 48, pp. 152–165, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.03.065.
- [40] R. Schmitt, “Pursuing innovative finance models to enable beneficial energy and water infrastructure and systems,” *Electr. J.*, vol. 33, no. 1, p. 106688, 2020, doi: 10.1016/j.tej.2019.106688.
- [41] B. T. Moghadam, “Economic Analysis and Determination of Solar Contribution of Solar Water Heaters in Different Parts of Iran,” no. April, 2019.
- [42] C. C. Ramírez and C. Recalde, “Small-Scale of Water Production Using Renewable Energy: Economic Evaluation,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 956–962, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.287.
- [43] E. Tzen, K. Perrakis, and P. Baltas, “Design of standalone PV desalination system for rural areas,” *Desalination*, vol. 119, pp. 327–334, 1998.
- [44] D. Herold, V. Horstmann, A. Neskakis, J. Plettner-Marliani, G. Piernavieja, and R.



- Calero, “Small scale photovoltaic desalination for rural water supply - demonstration plant in Gran Canaria,” *Renew. Energy*, vol. 14, no. 1–4, pp. 293–298, 1998, doi: 10.1016/S0960-1481(98)00080-9.
- [45] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [46] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Termodinámica*, Septima. McGrallhill, 2012.
- [47] J. Azcón-Bieto and M. Talón, *Fundamentos de fisiología vegetal*, Segunda ed. Madrid: McGraw-Hill, 2003.
- [48] M. G. Arredondo Hidalgo and J. C. Meléndez Sánchez, “Manuel Doblado enciclopedia,” *H. Ayuntamiento de Manuel Doblado*. <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM11guanajuato/municipios/11008a.html> (accessed Aug. 09, 2019).
- [49] Banco de México, “Sistema de información económica,” 2019. <https://www.banxico.org.mx/tipcamb/main.do?page=tas&idioma=sp> (accessed Feb. 04, 2020).
- [50] D. Herold and A. Neskakis, “A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria,” *Desalination*, vol. 137, no. 1–3, pp. 285–292, 2001, doi: 10.1016/S0011-9164(01)00230-2.
- [51] N. Lantzke, T. Calder, and J. Burt, “Water salinity and plant irrigation,” *Western Australia Department of Agriculture and Food*, 2019. <https://www.agric.wa.gov.au/fruit/water-salinity-and-plant-irrigation> (accessed Aug. 13, 2019).
- [52] SIAP, “Estadística de Producción Agrícola,” *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*, 2018. <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php> (accessed Aug. 19, 2019).

# ANEXOS

## ANEXO 1 TSM-255-PC05A data sheet

Mono
Multi
Solutions

# TSM-PC05A

# TSM-PA05A

## THE Honey MODULE

by Trina Solar

15.9%

MAX EFFICIENCY

260W

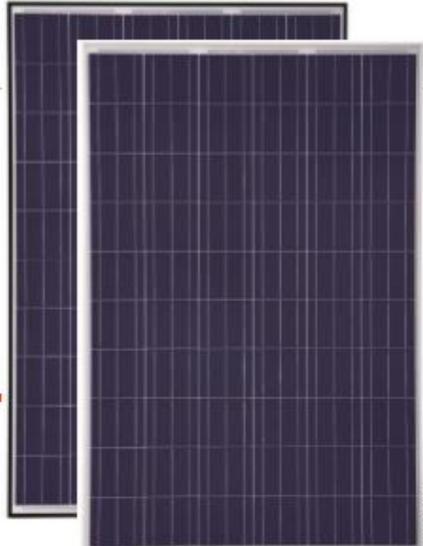
MAX POWER OUTPUT

10 YEAR

PRODUCT WARRANTY

25 YEAR

LINEAR POWER WARRANTY



- 

Module can bear snow loads up to **5400Pa** and wind loads up to **2400Pa**
- 

Guaranteed power output **0~+3%**
- 

High performance under low light conditions  
**Cloudy days, mornings and evenings**
- 

Manufactured according to International Quality and Environment Management System Standards **ISO9001, ISO14001**
- 

**MC4** photovoltaic connectors increase system reliability

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY

10 Year Product Warranty + 25 Year Linear Power Warranty

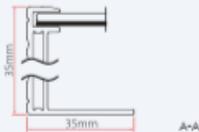
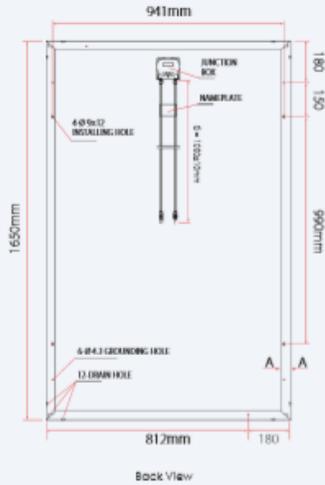


Trina Solar Limited  
www.trinasolar.com

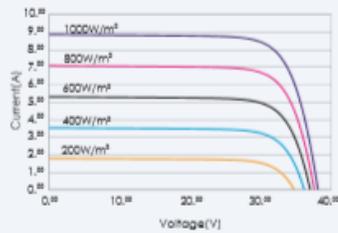


## TSM-PC05A / TSM-PA05A THE Honey MODULE

### DIMENSIONS OF PV MODULE TSM-PC/PA05A



### I-V CURVES OF PV MODULE TSM-255 PC/PA05A



Average efficiency reduction of 4.5% at 200W/m<sup>2</sup> according to EN 60904-1.

### CERTIFICATION



ELECTRICAL DATA @ STC	TSM-250 PC/PA05A	TSM-255 PC/PA05A	TSM-260 PC/PA05A
Peak Power Watts-P <sub>MAX</sub> [Wp]	250	255	260
Power Output Tolerance-P <sub>MAX</sub> [%]	0/+3	0/+3	0/+3
Maximum Power Voltage-V <sub>MPP</sub> [V]	30.3	30.5	30.6
Maximum Power Current-I <sub>MPP</sub> [A]	8.27	8.37	8.50
Open Circuit Voltage-V <sub>OC</sub> [V]	38.0	38.1	38.2
Short Circuit Current-I <sub>SC</sub> [A]	8.79	8.88	9.00
Module Efficiency η <sub>m</sub> [%]	15.3	15.6	15.9

Values at Standard Test Conditions STC (Air Mass AM1.5, Irradiance 1000W/m<sup>2</sup>, Cell Temperature 25°C). Power measurement tolerance: ±3%

ELECTRICAL DATA @ NOCT	TSM-250 PC/PA05A	TSM-255 PC/PA05A	TSM-260 PC/PA05A
Maximum Power-P <sub>MAX</sub> [Wp]	183	186	190
Maximum Power Voltage-V <sub>MPP</sub> [V]	27.3	27.4	27.5
Maximum Power Current-I <sub>MPP</sub> [A]	6.70	6.79	6.91
Open Circuit Voltage (V)-V <sub>OC</sub> [V]	34.8	34.9	35.0
Short Circuit Current (A)-I <sub>SC</sub> [A]	6.99	7.11	7.20

NOCT: Irradiance at 800W/m<sup>2</sup>, Ambient Temperature 20°C, Wind Speed 1m/s. Power measurement tolerance: ±3%

### MECHANICAL DATA

Solar cells	Multicrystalline 156 = 156mm (6 inches)
Cell orientation	60 cells (6 × 10)
Module dimensions	1650 × 992 = 35mm (64.95 × 39.05 × 1.37 inches)
Weight	18.6kg (41.0 lb)
Glass	High transparency solar glass 3.2mm (0.13 inches)
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP 65 rated
Cables	Photovoltaic Technology cable 4.0mm <sup>2</sup> (0.006 inches <sup>2</sup> ), 1000mm (39.4 inches)
Connector	Original MC4

### TEMPERATURE RATINGS

Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)	44°C (±2°C)
Temperature Coefficient of P <sub>MAX</sub>	-0.41%/°C
Temperature Coefficient of V <sub>OC</sub>	-0.32%/°C
Temperature Coefficient of I <sub>SC</sub>	0.053%/°C

### MAXIMUM RATINGS

Operational Temperature	-40~+85°C
Maximum System Voltage	1000V DC(IEC)/600V DC(UL)
Max Series Fuse Rating	15A

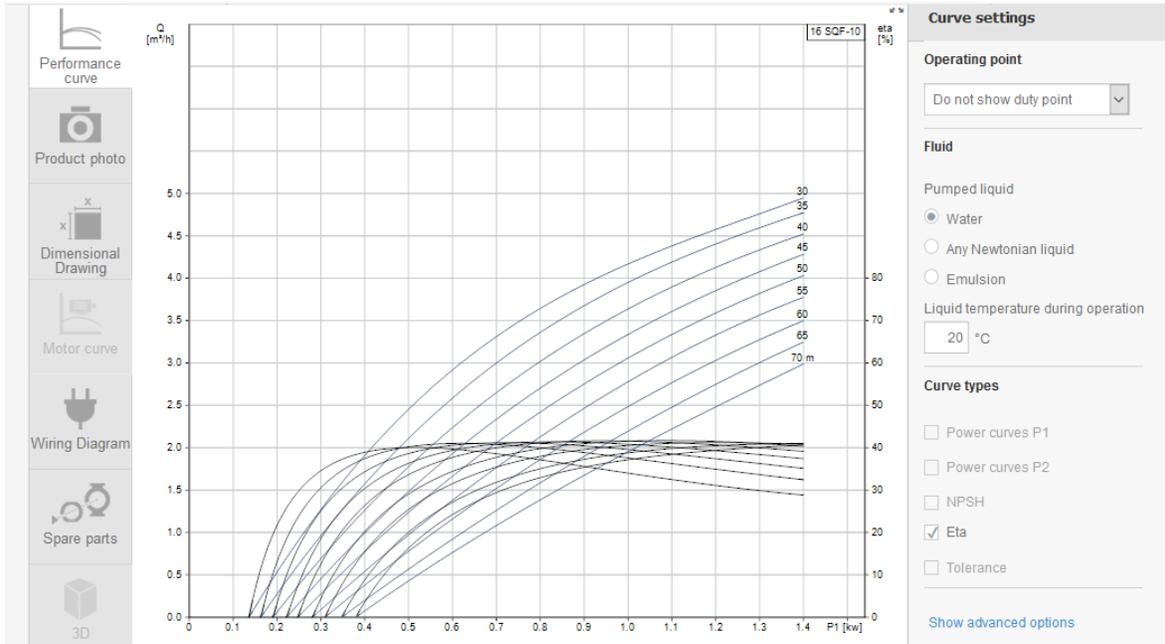
### WARRANTY

- 10 year Product Workmanship Warranty
  - 25 year Linear Power Warranty
- (Please refer to product warranty for details)

### PACKAGING CONFIGURATION

- Modules per box: 29 pieces
- Modules per 40' container: 812 pieces

ANEXO 2 Curva característica de la bomba 16 SQF-10





## ANEXO 3 Membrana ESNA1-LF-4040 data sheet

**Nitto****HYDRANAUTICS**  
Nitto Group Company**ESNA1-LF-LD-4040****Specified Performance\***

Permeate Flow:	1,900 gpd (7.2 m <sup>3</sup> /d)
CaCl <sub>2</sub> Rejection:	93% (88% - 97% minimum/maximum)
Test Conditions:	500 ppm CaCl <sub>2</sub> 75 psig (0.52 MPa) Applied Pressure 77 °F (25 °C) Operating Temperature 15% Permeate Recovery 6.5 - 7.0 pH Range

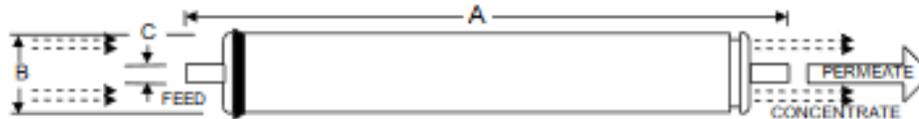
\* Expected calcium rejection for a typical 500 ppm well water is 96% at 13 gfd operating flux and 25 C.

\*The Specified Performance is based on data taken after a minimum of 10 minutes of operation. Actual testing of elements may be done at conditions which vary from these exact values; in which case, the performance is normalized back to these standard conditions. Permeate flow for individual elements may vary -20 or +25 percent from the value specified.

**General Product Description\*\***

Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
Membrane Polymer:	Composite Polyamide
Membrane Active Area**:	60 ft <sup>2</sup> (7.43 m <sup>2</sup> )
Feed Spacer:	34 mil (0.86mm)

Packaging: All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and O-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.



Element Details\*\*

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

Core tube extension = 1.85" (26.7 mm)

\*\*Values listed are indicative, not specified. For more detailed specifications, see our Technical Service Bulletin documents or contact Hydranautics Technical Department.

**Product Use and Restrictions<sup>^</sup>**

Maximum Applied Pressure:	600 psig (4.14 MPa)
Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning):	2-10 (2-12 at 25C for 30 minutes)
Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
Maximum Feed Flow:	16 gpm (3.6 m <sup>3</sup> /h)
Minimum Brine Flow:	3 gpm (0.7 m <sup>3</sup> /h)
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi (0.10 MPa)

<sup>^</sup> The limitations shown here are for general use. For specified projects, operation at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletin for more details.

**Disclaimer:** The information and data are presented in good faith and in lieu of all warranties. All express or implied warranties, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, are hereby disclaimed and excluded. Conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 1/29/2019

Hydranautics Corporate office

401 Jones Road, Oceanside, CA 92058, USA Toll Free: +1-800-CPA-PURE Tel: +1-760-901-2500 Fax: +1-760-901-2578  
Web: www.membrana.com Email: hy-info@nitto.com