

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un sistema integrado de desalinización y producción de
hidrógeno basado en energía solar

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingenieros Mecánicos

Presentado por:

Stephano Arturo Alvarado Portilla

Anthony German Nasipucha Cazco

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a nuestras familias, amigos y docentes quienes han sido un pilar fundamental en nuestra vida académica.

AGRADECIMIENTOS

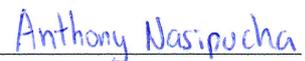
Agradecemos en demasía a Dios, por darnos el empuje para alcanzar esta meta en nuestra formación profesional. A nuestras familias por el esfuerzo y apoyo incondicional brindado en cada etapa de nuestras vidas. Al PhD. Guillermo Soriano y al PhD. Gonzalo Almeida, quienes plantearon las bases de este proyecto y brindaron su ayuda permanente en la supervisión del mismo. A la M.Sc. Andrea Boero, por su guía y supervisión. Al M.Sc Rubén Hidalgo, por su aporte significativo en el desarrollo de este trabajo. Finalmente, a nuestros compañeros y amigos por la motivación brindada.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Stephano Arturo Alvarado Portilla* y *Anthony German Nasipucha Cazco* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Stephano Arturo
Alvarado Portilla



Anthony German
Nasipucha Cazco

EVALUADORES

Andrea Boero, M.Sc.
PROFESOR DE LA MATERIA

Guillermo Soriano, Ph.D.
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La inaccesibilidad al agua potable es un gran reto en zonas áridas y cercanas al mar, pues los procesos de desalinización poseen un alto consumo energético y para lograr el mejor uso de los recursos de energía renovable se requiere un adecuado sistema de almacenamiento de energía. En la comunidad insular “Cerrito de los Morreños” las fuentes de agua dulce son escasas y el suministro eléctrico es basado en combustibles fósiles. Por ello, se propone la instalación de un sistema híbrido integrado por un sistema autónomo fotovoltaico, de desalinización por ósmosis inversa y electrolizador de membrana de intercambio protónico (PEM) para aprovechar la energía solar en la producción de agua potable y generación de hidrógeno mediante los excedentes de energía. Para desarrollar este proyecto se modeló el sistema de ósmosis inversa mediante el entorno Matlab/Simulink a fin de determinar la demanda energética de la planta. Posteriormente, este perfil energético fue ingresado durante un año meteorológico típico en el software HOMER Pro y se dimensionó un sistema fotovoltaico del cual se determinó el exceso de producción eléctrica. Con ello, se seleccionó y modeló un electrolizador PEM que aproveche la mayor cantidad de esta energía en la obtención de hidrógeno. Por lo tanto, considerando un presupuesto de \$479,133.00 para el sistema integrado, se obtiene una producción diaria de 18 m³ de agua dulce y una eficiencia energética general máxima del 52.3 %, además se mitiga la emisión anual de 27 toneladas de CO₂ al evitar usar combustibles fósiles.

Palabras Clave: Energía renovable, ósmosis inversa, hidrógeno, eficiencia energética, modelado y simulación

ABSTRACT

The inaccessibility of drinking water is a great challenge in arid areas and near the sea, since desalination processes have a high energy consumption and to achieve the best use of renewable energy resources, an adequate energy storage system is required. In the island community "Cerrito de los Morreños" fresh water sources are scarce and the electricity supply is based on fossil fuels. For this reason, the installation of a hybrid system composed of an autonomous photovoltaic system, desalination by reverse osmosis and a proton exchange membrane (PEM) electrolyser is proposed to take advantage of solar energy in the production of drinking water and hydrogen generation through the surplus energy. To develop this project, the reverse osmosis system was modeled using the Matlab/Simulink environment in order to determine the energy demand of the plant. Subsequently, this energy profile was entered during a typical meteorological year in HOMER Pro software and a photovoltaic system was dimensioned, from which the excess electrical production was determined. Thus, a PEM electrolyser was selected and modeled that takes advantage of the greatest amount of this energy to obtain hydrogen. Therefore, considering a budget of \$479,133.00 for the integrated system, a daily production of 18 m³ of fresh water is obtained and a maximum overall energy efficiency of 52.3 %, in addition, the emission of 27 tons of CO₂ per year is mitigated by avoiding the use of fossil fuels.

Keywords: *Renewable energy, reverse osmosis, hydrogen, energy efficiency, modeling and simulation*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del problema	1
1.2 Justificación del proyecto	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo general.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 Situación en la región	3
1.4.2 Estado actual de la desalinización a nivel global	4
1.4.3 Sistema de ósmosis inversa (OI).....	5
1.4.4 Fuentes de energía renovable para sistemas OI	6
1.4.5 Energía solar y paneles fotovoltaicos.....	7
1.4.6 Papel del hidrógeno verde en la transición energética	8
1.4.7 Producción de hidrógeno mediante electrólisis.....	9
1.4.8 Normativas y estándares	10

CAPÍTULO 2	12
2. Metodología	12
2.1 Diseño conceptual	12
2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente.....	12
2.1.2 Criterios de diseño	13
2.1.3 Alternativas de solución	14
2.1.4 Matriz de decisión	15
2.2 Diseño preliminar de los sistemas involucrados	16
2.2.1 Sistema hidráulico.....	16
2.2.2 Sistema de potencia y aprovechamiento energético.....	17
2.3 Diseño detallado del sistema OI.....	18
2.3.1 Datos de entrada para el diseño del sistema OI	19
2.4 Modelamiento del sistema OI	19
2.5 Consumo energético de la planta OI.....	20
2.6 Diseño detallado del sistema de potencia.....	20
2.6.1 Recurso energético.....	21
2.6.2 Modelamiento del sistema de potencia en HOMER Pro	22
2.6.3 Datos de entrada para el diseño en HOMER Pro	24
2.7 Sistema de aprovechamiento energético	26
2.8 Simulación del sistema integrado.....	27
CAPÍTULO 3	28
3. Resultados y análisis	28
3.1 Dimensionamiento del sistema de membranas OI	28
3.2 Dimensionamiento del sistema hidráulico.....	30
3.2.1 Tuberías y accesorios.....	30
3.2.2 Sistema de bombeo	31

3.2.3	Sistema de almacenamiento de agua	31
3.3	Sistema fotovoltaico autónomo (SFA).....	31
3.3.1	Demanda energética de la planta OI	31
3.3.2	Simulación en HOMER Pro	32
3.3.3	Producción y demanda energética	32
3.4	Sistema de producción de hidrógeno.....	33
3.5	Sistema integrado.....	33
3.6	Análisis técnico y económico.....	39
3.6.1	Planta OI	39
3.6.2	SFA y producción de hidrógeno	40
3.6.3	Costos de capital del sistema integrado.....	41
3.6.4	Costos operativos del sistema integrado.....	41
3.7	Análisis del impacto ambiental	42
3.7.1	Ahorro potencial en generación de CO ₂ y consumo de combustible.....	42
3.7.2	Gestión del agua de rechazo	42
CAPÍTULO 4		43
4.	Conclusiones y recomendaciones	43
4.1	Conclusiones	43
4.2	Recomendaciones.....	45

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OI	Ósmosis inversa
FER	Fuentes de energía renovable
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
PEM	<i>Proton Exchange Membrane</i>
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
OMS	Organización Mundial de la Salud
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MAE	Ministerio del Ambiente del Ecuador
SDT	Sólidos disueltos totales
FV	Fotovoltaico
BAT	Baterías
H ₂	Hidrógeno
MCI	Motor de combustión interna
LHV	<i>Lower heating value</i>
SFA	Sistema fotovoltaico autónomo
SMA	<i>System Mess und Anlagentechnik</i>
UM	Unidad de medida

SIMBOLOGÍA

m	Metro
kW	Kilovatio
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
h	Hora
L	Litro
ppm	Partes por millón
MPa	Megapascal
°C	Grado Celsius
kWh	Kilovatio hora
s	Segundo
V	Voltio
A	Amperio
Nm ³ /h	Normal metro cúbico
kg	Kilogramo
un	Unidad
USD	Dólar estadounidense
H ₂	Hidrógeno molecular
O ₂	Oxígeno molecular
CO ₂	Dióxido de carbono

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama del proceso de ósmosis inversa	5
Figura 1.2 Esquema de una membrana en espiral para ósmosis inversa	6
Figura 1.3 Diagrama de funcionamiento de una celda solar	8
Figura 1.4 Esquema de una celda de electrólisis PEM	9
Figura 2.1 Metodología de diseño	12
Figura 2.2 Sistema integrado de producción de agua potable e hidrógeno.....	16
Figura 2.3 Esquema del sistema de potencia	18
Figura 2.4 Ubicación de la planta desalinizadora.....	21
Figura 2.5 Radiación global diario en la comunidad “Cerrito de los Morreños”	22
Figura 2.6 Temperatura diaria en la comunidad “Cerrito de los Morreños”	22
Figura 3.1 Modelo Simulink del sistema de membranas.....	29
Figura 3.2 Producción y demanda OI mensual de energía.....	32
Figura 3.3 Modelo Simulink del sistema integrado.....	34
Figura 3.4 Producción máxima y promedio mensual de hidrógeno	35
Figura 3.5 Requerimiento de agua fresca para electrólisis	36
Figura 3.6 Producción y demanda OI+PEM mensual de energía.....	36
Figura 3.7 Energía equivalente mensual del hidrógeno.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Normativas y regulaciones	11
Tabla 2.1 Requerimientos y especificaciones de diseño	13
Tabla 2.2 Criterios de diseño	14
Tabla 2.3 Propuestas de solución	14
Tabla 2.4 Matriz de decisión.....	15
Tabla 2.5 Identificación de los tramos del sistema hidráulico	17
Tabla 2.6 Tecnologías empleadas en el tratamiento de agua para desalación.....	17
Tabla 2.7 Pasos para diseñar un sistema de membranas	18
Tabla 2.8 Características del agua salobre de alimentación.....	19
Tabla 2.9 Coordenadas geográficas de la ubicación de la planta	21
Tabla 2.10 Información de los paneles fotovoltaicos.....	24
Tabla 2.11 Información de las baterías	25
Tabla 2.12 Información del inversor	25
Tabla 3.1 Especificaciones de la membrana OI	28
Tabla 3.2 Sistema de membranas 2x6 a 5 MPa	29
Tabla 3.3 Sistema de membranas 2x6 a 6 m ³ /h	30
Tabla 3.4 Líneas de tubería para cada tramo	30
Tabla 3.5 Sistema de bombeo de la planta OI	31
Tabla 3.6 Sistema de almacenamiento de la planta OI.....	31
Tabla 3.7 Resultados del sistema fotovoltaico autónomo	32
Tabla 3.8 Características del electrolizador H-Tec S 30/50	33
Tabla 3.9 Parámetros de operación del sistema OI	34
Tabla 3.10 Eficiencia energética del la planta OI y del electrolizador PEM.....	38
Tabla 3.11 Comparación de eficiencia energética con aprovechamiento.....	38
Tabla 3.12 Equipos y accesorios del sistema OI.....	39
Tabla 3.13 Costos de la planta OI	40
Tabla 3.14 Costos del SFA y sistema de generación de hidrógeno	40
Tabla 3.15 Resumen de costos	41
Tabla 3.16 Costos operativos	41

Tabla 3.17 Características del motor estacionario LC196FD.....	42
Tabla 3.18 Resumen del impacto ambiental en el suministro eléctrico	42

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del problema

La falta de accesibilidad a agua que cumpla con estándares para el consumo humano es una grave dificultad en varias regiones del mundo, debido a la escasez de agua y la contaminación, la cual se agrava con el crecimiento demográfico y el cambio climático. En zonas áridas y cercanas al mar se presenta como un gran desafío, pues la utilización del agua de mar para beber se encuentra restringida por el alto consumo específico de energía requerido en los procesos de desalinización que los vuelve demasiado costosos (Fountain, 2019). Ante esta situación, la industria de la desalinización ha mostrado impactos ambientales negativos, debido al uso tradicional de combustibles fósiles para atender al requerimiento energético de estas tecnologías.

En virtud de ello, se ha vuelto necesario que los sistemas de desalinización sean sostenibles, debido a que, en comunidades cercanas al mar, como en algunas zonas del territorio ecuatoriano, no cuentan con acceso al sistema nacional interconectado. A pesar de que estas zonas permiten la explotación de fuentes de energía renovable y energías tienen un gran potencial de reducción de emisiones resulta complicado alcanzar un acoplamiento perfecto entre la capacidad de generación y la demanda energética, debido a la intermitencia de los recursos renovables, lo cual se refleja en la generación de excesos de energía que deberían ser aprovechados mediante el uso de vectores energéticos que contribuyan a una mejor integración del sistema.

1.2 Justificación del proyecto

La necesidad de un sistema confiable de suministro agua dulce en comunidades de gran accesibilidad al mar es un desafío que contempla el uso de técnicas de desalinización, como una de las estrategias para abordar la

escasez de agua con un acceso justo y equitativo, a fin de garantizar una mejor calidad de vida a sus pobladores.

Los recursos de energía renovable, como la solar, pueden ser usados para energizar procesos como el de la desalinización del agua de mar en zonas fuera de la red, de forma que representan una alternativa para evitar el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, debido a la intermitencia de la intensidad de la radiación solar, se están estudiando diferentes métodos para almacenar y aprovechar el recurso energético. Durante los períodos de alta disponibilidad de energía en términos de intensidad solar, parte de esta se almacena para luego estabilizar el suministro de energía eléctrica. Sin embargo, existe un excedente de producción de energía que se desperdicia, entonces, el hidrógeno producido a partir de los excesos de energías renovables se considera como una oportunidad para valorizar esa fracción eléctrica intermitente.

El presente proyecto se desarrolla para ser escalable y aplicable en zonas de características similares a las mencionadas, donde el suministro de agua potable y energético es limitado. Para ello, como caso particular de estudio se analiza sobre una comunidad insular del Golfo de Guayaquil, cuya situación se detalla en la sección 1.4.1.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema híbrido de tratamiento de agua salobre y generación de hidrógeno, mediante la utilización de energía solar fotovoltaica para una zona árida y cercana al mar.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo de simulación del sistema físico integrado validado a través de datos teóricos, experimentales o de la industria.

2. Proponer un diseño basado en el estudio de distintos escenarios de operación del sistema y disponibilidad del recurso de energía renovable.
3. Determinar el desempeño energético, económico y ambiental del sistema propuesto.

1.4 Marco teórico

A continuación, se da a conocer sobre la situación de una comunidad respecto a la falta de un sistema de abastecimiento de agua dulce, sobre los sistemas de desalinización y su crecimiento a nivel global. También se presenta el principio de ósmosis inversa, y las fuentes de energía renovables aplicables a los sistemas desalinizadores. Además, se menciona sobre el protagonismo del hidrógeno, dentro de la transición energética de estos sistemas, y su proceso de producción.

1.4.1 Situación en la región

La comunidad “Cerrito de los Morreños” se asienta sobre la isla Chupadores Chico, en la parte central del estuario interior del Golfo de Guayaquil, provincia del Guayas. En esta comunidad se ha estimado una población local de 570 personas (García, 2019).

En el sector existen dos pozos de agua de los cuales uno es de uso privado y el otro, que posee una profundidad de 29 m, es de uso general pero tan solo permite extraer agua salobre debido a la carencia de mantenimiento. Alternativamente, los moradores aprovechan la época invernal para recolectar en una sola lluvia hasta 240 galones por vivienda. Ante la falta de un servicio de agua potable, los pobladores se abastecen de reservorios, mediante el uso de las prestaciones de los tanqueros. Estos intermediarios son quienes trasladan bajo limitadas condiciones de salubridad el líquido desde Guayaquil hacia la isla (Asociación Usuarios del Manglar Cerrito de los Morreños, 2010).

Cabe mencionar que, desde que las empresas camaroneras interrumpieron su servicio de abastecimiento de agua potable a la población en el 2008, esta es la situación que se vive en la comunidad hasta la actualidad. Por otra parte, la principal fuente de suministro eléctrico de la isla es un generador a diésel de 195 kW e independientemente del consumo cada vivienda debe cancelar el valor de \$1 diario para adquirir este servicio durante 6 horas (Urquizo et al., 2019).

1.4.2 Estado actual de la desalinización a nivel global

Desde el año 1881, cuando se instaló la primera planta desalinizadora tradicional del mundo en Malta para cubrir la escasez de agua dulce en la isla, las plantas de desalinización surgieron en muchas zonas donde el acceso al agua potable era escaso o no existía del todo, las tecnologías de desalinización han atravesado un gran auge; desde la primera planta de destilación multiefecto (MED) en 1930 en Arabia Saudita, pasando por la primera planta de destilación flash multietapa (MSF) en 1957 en Kuwait, hasta la primera planta de ósmosis inversa (OI) en 1965 en Estados Unidos, ante ello las actividades de investigación se han centrado en el ahorro energético, ahorro de costos y reducción de la huella ecológica para la producción de agua dulce, especialmente en la desalinización basadas en membranas OI (Eke et al., 2020).

Estos sistemas desalinizadores, se han desarrollado en conjunto a la sociedad, puesto que conforme los seres humanos han evolucionado en todo tipo de ámbitos, ha existido una notable disminución de las fuentes preexistentes de agua potable y un aumento considerable en la contaminación de estas fuentes de agua.

Según Voutchkov (2018), se estima que desde el 2010, los proyectos de producción de agua por desalinización han incrementado de un 5 % a un 6 % por año, lo que insinúa un aumento anual en la capacidad de 3 hasta 4 millones de m³/día del total de plantas instaladas. Por ejemplo, en el período de junio de 2015 a julio de 2016, un total de 512 plantas nuevas a

nivel mundial permitieron la obtención de 3.7 millones de m³/día de agua potable.

En definitiva, la desalinización en el mundo surgió de la necesidad para abastecer el consumo humano, sin embargo, se ha venido desarrollando como forma de reparar un daño notable del efecto que el ser humano tiene en el planeta y lo que su evolución ha conllevado.

1.4.3 Sistema de ósmosis inversa (OI)

La ósmosis inversa (OI) es una técnica de desmineralización que se aplica para separar los sólidos disueltos del agua a través de una membrana semipermeable con una presión superior a la osmótica. En la Figura 1.1, se muestra un sistema OI con sus componentes principales (Kucera, 2010).

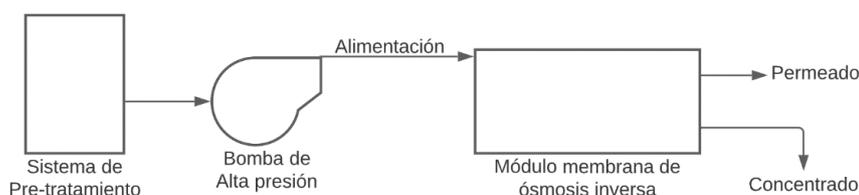


Figura 1.1 Diagrama del proceso de ósmosis inversa. Adaptado de Kucera (2010)

Según Kucera (2010), existen cuatro tipos de membrana OI de los cuales el tipo en espiral es propicio para la desalinización por su gran área de superficie específica y tasa de permeación. En estas membranas, el agua salobre de alimentación ingresa desde un extremo con alta presión para penetrar la capa activa de poliamida y luego de moverse en espiral hacia el interior, el agua desalinizada (permeado) se acumula en el tubo colector. El agua de rechazo (concentrado) es recogido del otro extremo para su recuperación o eliminación, como se visualiza en la Figura 1.2.

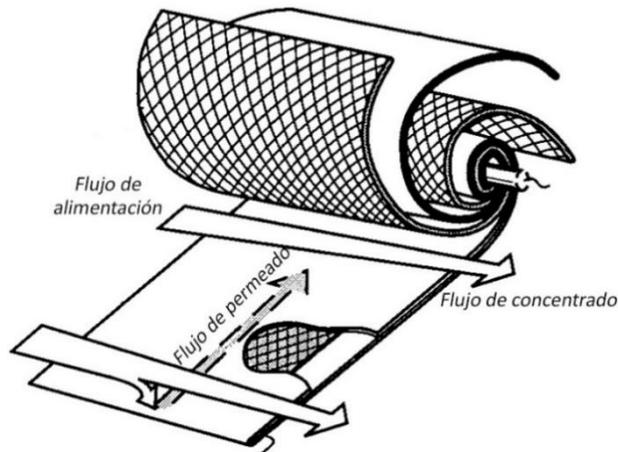


Figura 1.2 Esquema de una membrana en espiral para ósmosis inversa.
Adaptado de Abdul et al. (2021)

Cabe indicar que, el consumo energético de las plantas desalinizadoras es afectado por factores clave como la temperatura y salinidad del agua de alimentación, tipo de membrana y fuente de energía, la eficiencia de las bombas de alta presión, y la tasa de recuperación del agua como permeado (Voutchkov, 2018).

1.4.4 Fuentes de energía renovable para sistemas OI

Las energías renovables, son las que utilizan como fuente energética los medios naturales, como lo son el viento, el sol, la marea. Actualmente, este tipo de energía se ha estudiado como fuente principal de suministro para los sistemas de desalinización, con el fin de reemplazar los medios de generación a base de combustibles fósiles, debido a factores como la inseguridad del suministro energético y la contaminación ambiental.

Al tener un sistema de ósmosis inversa, como se mencionó anteriormente en la sección 1.4.3, la cantidad de energía para superar la presión osmótica sobre las membranas es alta, sin embargo, debido a los avances en estas dos décadas, esa energía se ha reducido a la mitad en comparación a cuando se inició con esta tecnología (Voutchkov, 2018). Por ello, se torna necesario emplear un sistema de suministro eléctrico eficiente para aprovechar al máximo los recursos energéticos de la zona.

1.4.5 Energía solar y paneles fotovoltaicos

La energía solar es la energía proveniente de las ondas electromagnéticas que se emiten desde la fuente natural conocida como el Sol. Esta energía se puede aprovechar principalmente mediante la transferencia por radiación en otro tipo de energía, generalmente a eléctrica mediante paneles fotovoltaicos. La cantidad de irradiancia de energía en el planeta Tierra es aproximadamente el $\pm 3.3\%$ (1.37 kW/m^2) del total de energía que irradia el sol, pero que gran parte se pierde en la reflexión producida por la atmósfera y otros factores (Rasero, 2011).

La energía solar al ser una fuente dependiente de la órbita terrestre alrededor del sol y de las condiciones meteorológicas presentes en el sitio de medición, estará intrínsecamente relacionada con la ubicación específica y el tiempo climático *in situ* (latitud, longitud, altitud, día, mes). Las mediciones de radiación al ser tan dependientes de condiciones meteorológicas y condiciones físicas provocan variabilidad en los modelos teóricos, y estos son desarrollados con base a modelos estocásticos, generados a partir de mediciones previas (Markvart & Castañer, 2012).

Principio de funcionamiento de celda solar

Los sistemas fotovoltaicos consisten en una serie de células solares las cuales reaccionan ante los cuantos de energía provenientes de la luz (fotones), mediante la emisión de electrones desde el lado negativo al positivo de la capa interior en un material eléctricamente conductor de forma que se genera una carga de corriente continua, tal como se visualiza en la Figura 1.3 (Rasero, 2011). Debido a que la corriente directa (DC) no puede emplearse convencionalmente, se utilizan inversores de corriente para el suministro eléctrico en corriente alterna (AC).

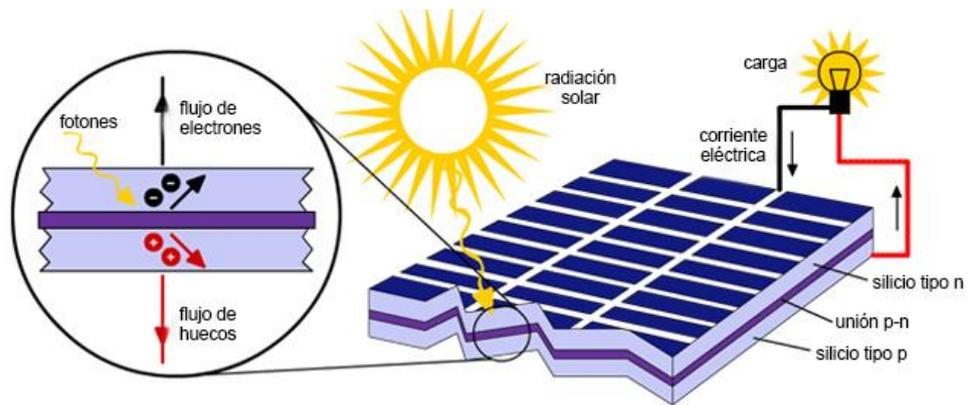


Figura 1.3 Diagrama de funcionamiento de una celda solar

1.4.6 Papel del hidrógeno verde en la transición energética

La mayoría de las fuentes de energía renovable (FER) presentan una dificultad para garantizar un suministro continuo de energía. A continuación, se presentan varios sistemas principales de acumulación de energía, los cuales son analizados con base a su capacidad y tiempo de almacenamiento (Sánchez, 2019).

- Supercondensadores: se caracterizan por su alta tasa de carga/descarga, pero su duración y capacidad se limitan al almacenamiento a baja escala y corto tiempo de almacenamiento.
- Baterías: se emplean extensamente para el almacenamiento a mediana-gran escala, pero poseen baja densidad energética, corta vida útil y no permiten un largo período de almacenamiento.
- Hidrógeno: brinda una amplia capacidad de almacenamiento con altos ciclos de descarga, flexibilidad energética y alta eficiencia, lo cual permite su aplicación a gran escala. Sin embargo, su desventaja radica en la gestión del almacenamiento.

Ante el planteamiento anterior, el proceso de producción del hidrógeno a partir de los excesos de energía se muestra como una opción prometedora para mejorar la eficiencia de los sistemas de potencia autónomos, debido a que se ha evidenciado que explotar la flexibilidad del hidrógeno de esta forma puede resultar económicamente viable a diferencia de diseñar un

sistema complejo basado solamente en baterías (Pellow et al., 2015). En adición al inconveniente en la gestión del almacenamiento del hidrógeno, se añade el alto costo de los equipos, por ende, para obtener una producción de bajo costo es necesario equilibrar la producción eléctrica renovable con un alto nivel operativo del sistema de generación de hidrógeno (Kikuchi et al., 2019).

De forma que los sistemas fotovoltaicos que incluyen sistemas híbridos de almacenamiento de energía de baterías-hidrógeno podrían representar una alternativa sostenible y confiable para el suministro de energía en zonas aisladas con cercanía al mar.

1.4.7 Producción de hidrógeno mediante electrólisis

Principio de electrólisis

La electrólisis es un proceso en el cual la molécula de agua se divide en hidrógeno (H_2) y oxígeno (O_2) ante la aplicación de una corriente eléctrica sobre dos electrodos. En la electrólisis PEM, el agua se disocia en oxígeno (O_2), protones (H^+) y electrones (e^-) en el ánodo, así los protones viajan mediante una membrana de intercambio de protones hacia el cátodo, mientras que, los electrones salen del ánodo a través del circuito eléctrico que suministra la fuerza impulsora para la reacción (voltaje reversible). En el cátodo, los protones y los electrones se recombinan para producir hidrógeno, como se muestra en la Figura 1.4 (Kumar & Himabindu, 2019).

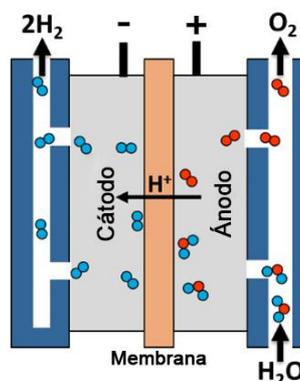
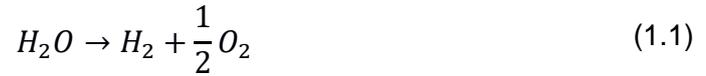
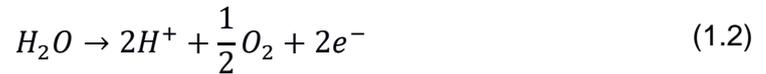


Figura 1.4 Esquema de una celda de electrólisis PEM

La reacción general de división electroquímica del agua es:



Donde para un proceso de electrólisis PEM, las reacciones de semicelda para el ánodo y el cátodo respectivamente son:



Dentro de electrolizadores existen 3 tipos, de los cuales IRENA (2018) en su reporte sobre Perspectivas tecnológicas para la transición energética, menciona que los electrolizadores alcalinos (ALK) son utilizados ampliamente a nivel industrial para operar eficientemente bajo carga constante. Mientras que, los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM) son muy comunes en la actualidad, debido a que son compactos y brindan un menor tiempo de respuesta en producción ante cargas variables. Los electrolizadores de óxido sólido (SOEC) apuntan a una mejor eficiencia energética, pero aún no se han consolidado.

Por tanto, la generación de hidrógeno mediante electrolizadores PEM permite almacenar con mayor eficiencia los excesos de energía que se presentan de forma intermitente.

1.4.8 Normativas y estándares

Las normativas y regulaciones aplicables en el presente trabajo se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Normativas y regulaciones

Entidad	Tipo de documento	Título	Utilidad
INEN	Norma Técnica Ecuatoriana - NTE INEN 1108:2014	Agua potable. Requisitos	Especificaciones del agua para las etapas de tratamiento
OMS	Guía de referencia	Guías para la calidad del agua de consumo humano	Indica la concentración en sólidos totales disueltos (SDT) permisibles en el agua
INEN	Norma Técnica Ecuatoriana - NTE INEN-ISO 3696:2013	Agua para uso en análisis de laboratorio - Especificación y métodos de ensayo	Señala la calidad del agua para el proceso de electrólisis
MAE	Norma ambiental	Anexo 1. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua	Especificaciones para la descarga a un cuerpo de agua marina

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En el diagrama de flujo de la Figura 2.1, se presenta las estrategias para llevar a cabo el proceso de diseño. Las fases del diseño se resumen en:

- Recopilación de las especificaciones y requerimientos de diseño
- Diseño conceptual o de forma del sistema integrado
- Diseño detallado de los sistemas involucrados

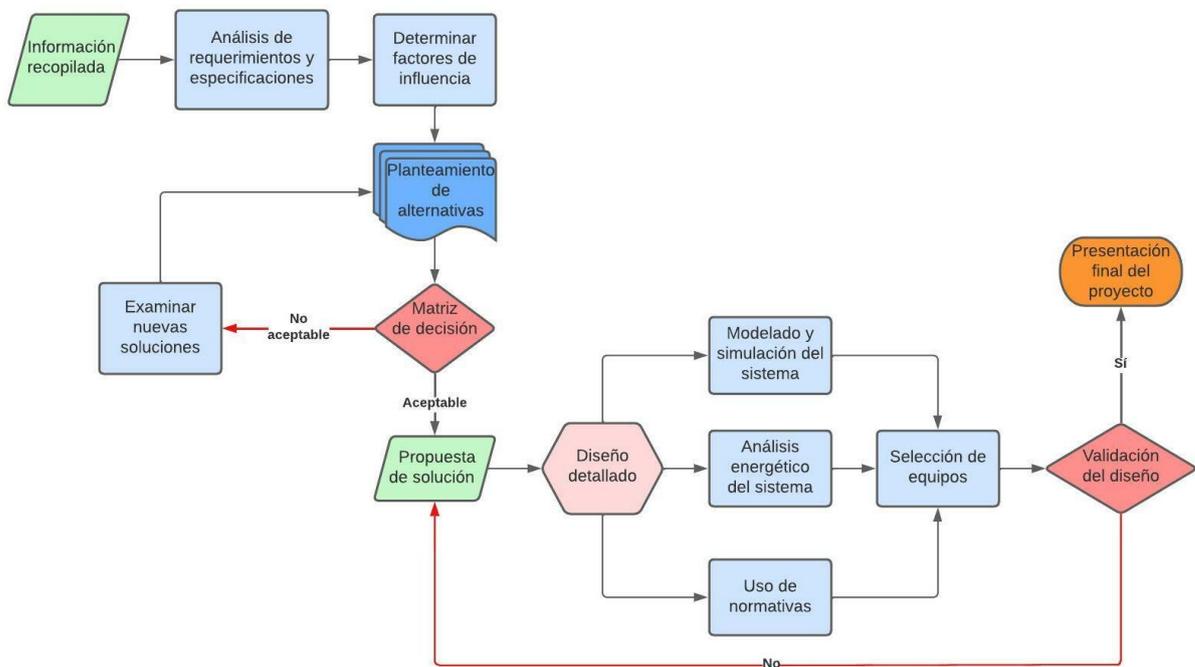


Figura 2.1 Metodología de diseño

2.1 Diseño conceptual

2.1.1 Requerimientos de diseño del cliente

Dentro de la recopilación de información se consideraron los requerimientos y especificaciones del cliente y las normativas aplicables para el diseño del sistema integrado, que se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Requerimientos y especificaciones de diseño

Requerimiento	Especificación
Funcionamiento	Operación constante de la unidad desalinizadora durante 6 h
Sistema de potencia	Utilización de fuentes de energía solar híbrida
Demanda	Abastecimiento de agua para 150 personas
Suministro y calidad del agua	Según el documento Guías para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS)
Autonomía	El sistema principal de almacenamiento de energía debe garantizar un suministro constante de energía a la planta
Aprovechamiento energético	Los excesos de energía deben ser usados en la producción de hidrógeno para su posterior conversión
Ambiental	Gestión del agua residual acorde a disposición del Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE)

De acuerdo con las limitaciones del proyecto la producción de agua dulce debe cubrir con la demanda del 25 % de la población local de la zona, es decir, 150 personas.

Para la calidad de agua potable es recomendable cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 1108 en las etapas de pretratamiento y postratamiento. De acuerdo con la OMS (2018), el agua con concentraciones menores a 600 ppm en SDT puede ser considerada como aceptable ante el consumo humano, y para garantizar un acceso óptimo a cada persona se debe brindar un promedio de 100 a 200 litros.

2.1.2 Criterios de diseño

A continuación, se presenta en la Tabla 2.2 los criterios de diseño desarrollados a partir de los factores de diseño considerados para evaluar las alternativas de solución.

Tabla 2.2 Criterios de diseño

Criterio	Peso	Descripción
Costo de inversión	0.09	Capital requerido para la implementación del sistema
Costo operativo	0.14	Costos relacionados a consumibles y refacciones
Mantenibilidad	0.16	Facilidad con la que es posible brindar mantenimiento a los equipos de los sistemas involucrados
Ambiental	0.23	Generación de gases de efecto invernadero durante la operación de la planta
Confiabilidad	0.2	Garantía del sistema para funcionar sin interrupciones
Eficiencia energética	0.18	Representación del aprovechamiento de la energía que es suministrada al sistema

2.1.3 Alternativas de solución

Para las propuestas que se muestran en la Tabla 2.3 la planta de ósmosis inversa hace uso del agua de alimentación de un reservorio, debido a que se conoce que este acumula el agua salobre del pozo de la zona y el agua potable se acopia en un tanque luego de su postratamiento. Por otra parte, la producción de hidrógeno es realizada mediante electrolizadores PEM, por las razones que se detallan en la sección 1.4.7.

Tabla 2.3 Propuestas de solución

Propuesta 1: Sistema FV-H2
La planta desalinizadora OI emplea como sistema de potencia a un arreglo de paneles fotovoltaicos para alimentar el sistema de bombeo de agua, donde los excesos de energía son almacenados como hidrógeno para su utilización en producción eléctrica.
Propuesta 2: Sistema FV-BAT-H2
El arreglo de paneles fotovoltaicos y baterías abastece de forma continua el consumo energético de la planta desalinizadora OI, donde los excesos de potencia son aprovechados en la generación de hidrógeno verde.
Propuesta 3: Sistema FV-MCI-H2
La planta desalinizadora OI utiliza un sistema de potencia basado en paneles fotovoltaicos y motores estacionarios para alimentar continuamente el sistema de bombeo, donde los excesos de energía son aprovechados para la producción de hidrógeno.

2.1.4 Matriz de decisión

La matriz de decisión que se presenta en la Tabla 2.4 es una herramienta que nos ha permitido determinar la solución más adecuada para el diseño.

Tabla 2.4 Matriz de decisión

Criterio	Peso	FV-H2		FV-BAT-H2		FV-MCI-H2	
Costo de inversión	0.09	4	0.27	5	0.45	7	0.63
Costo operativo	0.14	5	0.56	6	0.7	4	0.98
Mantenibilidad	0.16	5	0.8	7	1.12	6	1.44
Ambiental	0.23	9	2.07	8	1.84	4	0.92
Confiabilidad	0.2	5	1	7	1.6	8	1.4
Eficiencia energética	0.18	6	1.08	8	1.44	7	1.26
Total	1		6.01		7.09		5.93

De acuerdo con la Tabla 2.4, la mejor alternativa corresponde a un sistema de desalinización OI basado en un sistema de potencia de paneles fotovoltaicos, baterías y producción de hidrógeno mediante un electrolizador PEM.

A pesar de que no posee un bajo costo de inversión y operación, o gran facilidad en las labores de mantenimiento como un sistema que emplea motores estacionarios, resulta más económico que aquel basado solo en hidrógeno porque requiere un menor número de paneles fotovoltaicos y un sistema de almacenamiento de hidrógeno a baja escala, es decir, menor inversión y equipos que requieren mantenimiento. Además, con el uso de baterías la autonomía es garantizada en situaciones de baja disponibilidad solar y se reduce considerablemente el desperdicio energético en la generación de hidrógeno. Aunque este acoplamiento, es posible lograrlo mediante el uso de motores estacionarios, el costo operativo resultaría elevado por el precio del combustible y el impacto ambiental sería negativo principalmente por las emisiones de dióxido de carbono al ambiente.

2.2 Diseño preliminar de los sistemas involucrados

En la Figura 2.2 se muestra el esquema del sistema integrado por un sistema fotovoltaico autónomo para satisfacer la demanda energética, de desalinización por ósmosis inversa y electrolizador PEM para el aprovechamiento del recurso solar en la producción de agua potable y generación de hidrógeno a partir de los excedentes de energía.

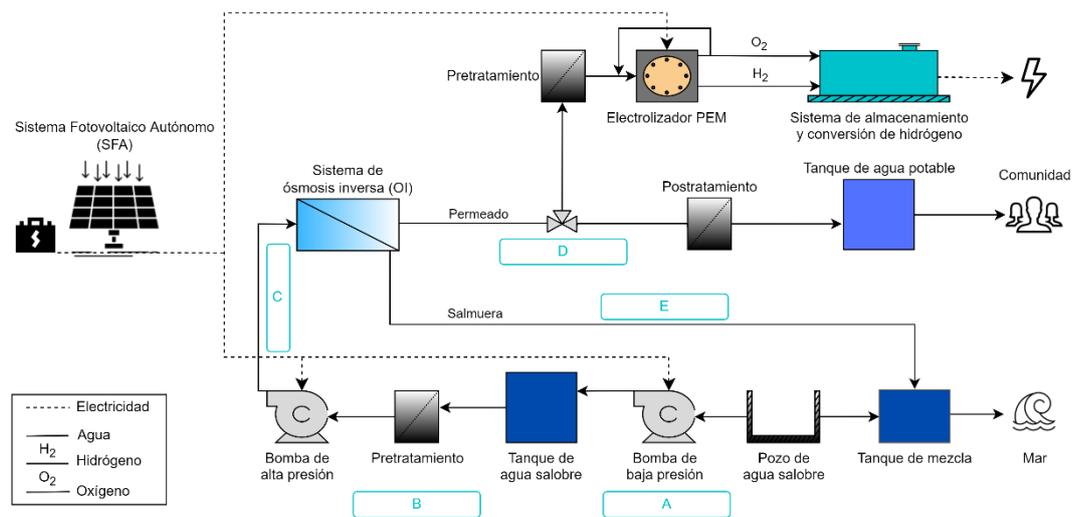


Figura 2.2 Sistema integrado de producción de agua potable e hidrógeno

2.2.1 Sistema hidráulico

Dentro del sistema hidráulico se consideró la presencia de un tanque de almacenamiento de agua salobre proveniente de uno de los pozos existentes en el lugar. El agua de alimentación atraviesa por una etapa de pretratamiento a fin de mantener la vida útil de las membranas. Ante esta situación, una bomba de alta presión suministra agua salobre a la unidad de membranas OI y como resultado se obtiene el permeado que es tratado a fin de ser almacenado como agua potable, y el concentrado como residuo del proceso. Para agilizar la identificación de los componentes del sistema hidráulico de la Figura 2.2, en la Tabla 2.5 se clasifican los tramos que lo constituyen.

Tabla 2.5 Identificación de los tramos del sistema hidráulico

Tramo	Descripción
A	Bombeo del agua salobre desde el pozo al tanque de almacenamiento
B	Línea de succión de la bomba desde el reservorio de agua salobre
C	Línea de descarga de la bomba hacia las membranas (alimentación)
D	Línea de descarga de permeado
E	Línea de descarga de la salmuera

Cabe mencionar que el diseño de las etapas de tratamiento no forma parte del alcance de este proyecto, pero de forma básica en la etapa de pretratamiento se utilizan elementos filtrantes para retener la mayor cantidad de sólidos en suspensión, la presencia de cloro y los compuestos orgánicos, a fin de alcanzar una filtración e índice de ensuciamiento adecuados, previo a las membranas se añaden dosificadores de antiincrustante para evitar la obstrucción sobre estas. Mientras que, en la etapa de postratamiento se hace uso de anticorrosivos, soluciones de cloro y regulares de pH para garantizar la calidad del agua potable. En la Tabla 2.6 se muestra un resumen de los métodos usados (Lenntech, 2017).

Tabla 2.6 Tecnologías empleadas en el tratamiento de agua para desalación. Adaptado de Lenntech (2017)

Pretratamiento	Postratamiento
Cloración y dechloración	Regulación del cloruro sódico
Coagulación / filtración multimedia	Remineralización
Inyección de antiincrustante	Regulación del pH
Filtración fina / ultrafiltración	Inyección de sosa cáustica
Floculación / sedimentación	Desinfección

2.2.2 Sistema de potencia y aprovechamiento energético

El esquema del sistema de potencia autónomo propuesto se visualiza en la Figura 2.3, el cual consiste en paneles fotovoltaicos y banco de baterías para proveer de energía eléctrica a la planta OI, un controlador de carga solar para regular el flujo de energía que se entrega a una barra colectora de corriente directa (DC) y un inversor DC/AC que transforma la corriente directa en alterna (AC). Cuando las baterías estén cargadas y no admitan

mayor energía, el controlador microrred desvía la energía eléctrica al electrolizador PEM, carga de desvío “*dump load*”, para producir hidrógeno.

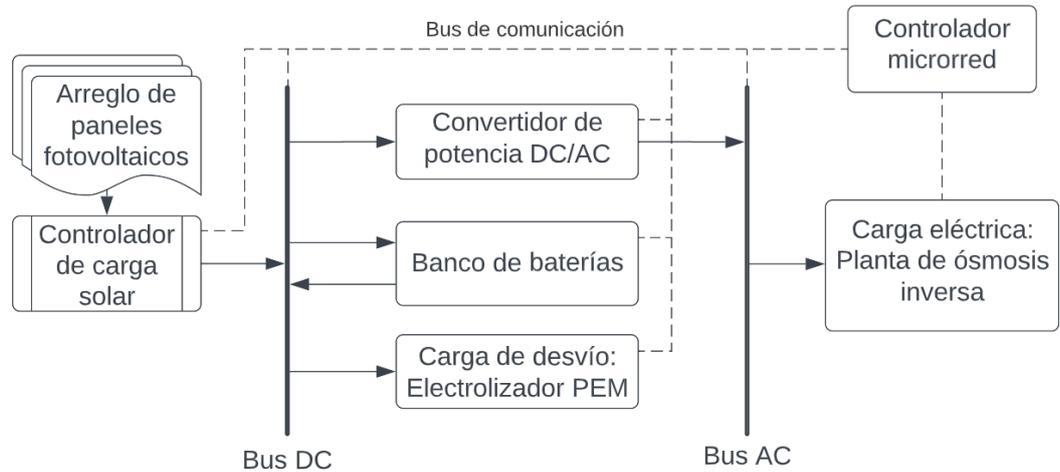


Figura 2.3 Esquema del sistema de potencia

2.3 Diseño detallado del sistema OI

En la Tabla 2.7 se describen los pasos para diseñar el sistema de membranas de la planta OI (Dow, 2018). Aunque, considerando que se trata de un proceso iterativo, es una guía útil para llevar a cabo el proceso de diseño.

Tabla 2.7 Pasos para diseñar un sistema de membranas. Adaptado de Dow (2018)

Paso	Descripción	Guía
1	Conocer el flujo y calidad del alimento/permeado	Caudal en m ³ /h y concentración SDT en ppm
2	Seleccionar la configuración de flujo y el número de pases	Configuración de flujo estándar y sin recirculación de concentrado
3	Seleccionar el tipo de membrana	Para desalinización de agua de mar
4	Seleccionar el flujo de membrana promedio	Revisar ficha técnica de membrana
5	Calcular el número de elementos necesarios	Controlar porcentaje de recuperación y caudal de permeado
6	Calcular el número de recipientes a presión	Elementos entre Elementos por recipiente
7	Seleccionar el número de etapas	No aplicable, pues no se requiere eliminar la mayor cantidad de minerales

2.3.1 Datos de entrada para el diseño del sistema OI

Dentro de las especificaciones se solicitó abastecer de agua dulce a 150 personas. Para brindar un acceso óptimo al agua cada persona debe recibir un promedio mayor a 100 litros por día (OMS, 2018). Por ello, se optó por brindar 120 litros diarios para cada persona, lo cual implica la producción mínima de agua desalinizada de 18 m³/día, es decir, 3 m³/h debido al requerimiento de funcionamiento de 6 horas al día.

Debido a la carencia de un estudio fisicoquímico del agua que se extrae del pozo de la comunidad, se consideró a las propiedades que se presentan en la Tabla 2.8 como constantes, las cuales clasifican al fluido como agua salobre de alta salinidad (Dow, 2018).

Tabla 2.8 Características del agua salobre de alimentación

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Temperatura del agua de alimentación	T_w	°C	25
Concentración de alimentación	C_f	ppm	10000

Cabe indicar que, se asumieron estos valores considerando que el agua atraviesa una etapa de pretratamiento químico antes de ingresar a las membranas según lo descrito en la sección 2.2.1. Además, la asunción del valor fijo de temperatura se verificó con el análisis energético, donde se encontró que la eficiencia energética se muestra invariable ante un perfil de temperatura (véase Tabla 3.10).

2.4 Modelamiento del sistema OI

El caudal de permeado Q [m³/h] a través de una membrana OI es directamente proporcional al producto entre el área de superficie humedecida S_e [m²] y la presión efectiva de conducción del agua desalinizada $(\Delta P - \Delta \pi)$ [MPa], donde el valor A [m/(h * MPa)] se conoce como el coeficiente de permeabilidad de la membrana.

$$Q = A * S_e * (\Delta P - \Delta \pi) \quad (2.1)$$

De acuerdo con Dow (2018) para simular el comportamiento de un diseño específico de sistema OI, existen dos formas: “elemento a elemento” y “sistema completo”. En el presente trabajo se escogió el primero, el cual es más riguroso, pero adecuado por el uso de recursos computacionales. Para su implementación se deben conocer la presión de alimentación y demás condiciones de funcionamiento del primer elemento. Así, se obtiene los parámetros del concentrado, que es la alimentación al segundo elemento, y luego de calcular los resultados para todos los elementos, la presión de alimentación original y la recuperación deben verificarse hasta conseguir un diseño aceptable. En consecuencia, se da al lector la opción de revisar con más detalle en el Apéndice A sobre las ecuaciones involucradas en este método.

2.5 Consumo energético de la planta OI

El consumo energético diario de la planta desalinizadora se da por el requerimiento energético del sistema de bombeo para suministrar continuamente agua salobre al sistema de ósmosis inversa durante su operación. Por ello este valor fue constante durante la simulación.

Para determinar el gasto energético del sistema de bombeo fue necesario determinar el cabezal de la bomba de alta presión, considerando los tramos de tubería y accesorios, y emplear el caudal de alimentación requerido por el sistema OI. Donde los diámetros de tubería y los accesorios fueron determinados con base en las velocidades del fluido y componentes del sistema recomendados (Dow, 2018).

2.6 Diseño detallado del sistema de potencia

Para el diseño del sistema de potencia basado en energía solar fotovoltaica, se empleó como herramienta HOMER Pro 3.14.2, el cual es un software para el diseño de proyectos con energía renovable y sistemas híbridos. A continuación, se presenta varios requerimientos para su utilización.

2.6.1 Recurso energético

2.6.1.1 Ubicación planta

Las coordenadas de la planta desalinizadora corresponden a la ubicación geográfica de la comunidad “Cerrito de los Morreños” obtenida de Google Earth (Google, s.f.).

Tabla 2.9 Coordenadas geográficas de la ubicación de la planta

Longitud	-79.90809°
Latitud	-2.47261°

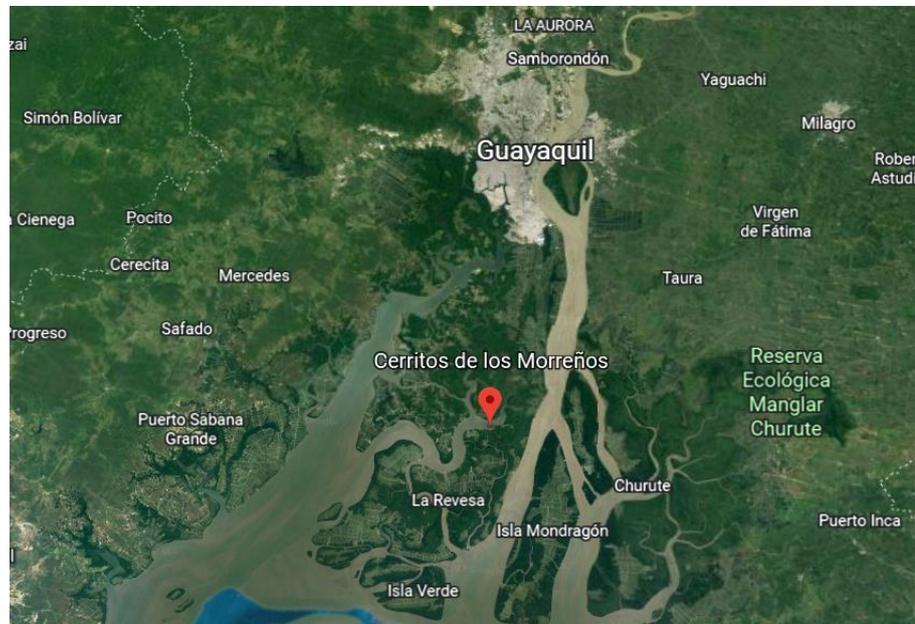


Figura 2.4 Ubicación de la planta desalinizadora (Google, s.f.)

2.6.1.2 Información meteorológica

La información climatológica fue obtenida de Meteonorm V7.3.4.21143, el cual, provee un informe detallado sobre la irradiancia media de la radiación global horizontal G_{gh} [W/m^2], en los diferentes meses del año como un promedio de la cantidad de irradiancia global presentada en la zona durante los días de cada mes. Este software hace uso de métodos estocásticos con el fin de modelar de manera empírica la cantidad de energía provista por el sol en un sitio determinado, en un período de estimación de al menos diez años (Metetest, s.f.). En la Figura 2.5 y Figura 2.6 se muestra

la variación de la radiación global diaria y la temperatura diaria durante un año, respectivamente.

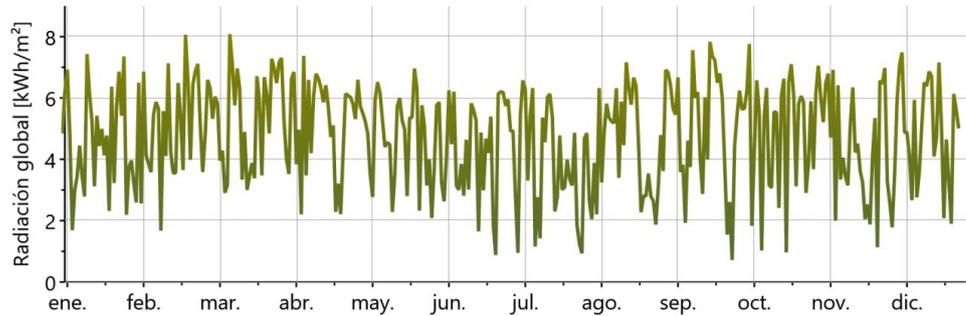


Figura 2.5 Radiación global diario en la comunidad “Cerrito de los Morreños” (Meteonorm, 2010)

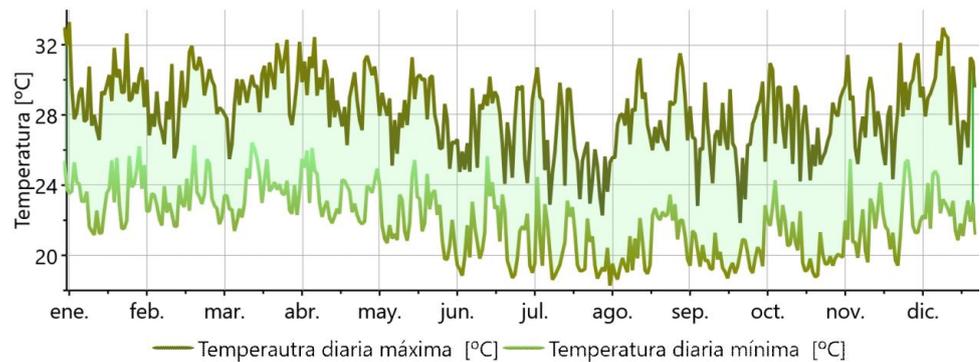


Figura 2.6 Temperatura diaria en la comunidad “Cerrito de los Morreños” (Meteonorm, 2010)

2.6.2 Modelamiento del sistema de potencia en HOMER Pro

HOMER Pro al ser un software de microrred de estándar mundial, permite dimensionar el sistema de potencia bajo un proceso de optimización, de distintas combinaciones de arreglos posibles, desde un criterio técnico-económico. Para simular la operación del sistema de suministro energético esta herramienta realiza cálculos de balance energético, contrastando la energía que el sistema de potencia predefinido puede proveer y la demanda de la carga eléctrica, por cada hora a fin de converger en un sistema óptimo (HOMER Energy, 2020).

Cabe recordar que para el presente proyecto el sistema de suministro corresponde a un arreglo de paneles fotovoltaicos y baterías, mientras que, el tiempo de simulación fue ajustado a un año como limitación en este estudio. A continuación, se muestra las ecuaciones características que la herramienta computacional emplea (HOMER Energy, 2020):

Potencia de salida de los paneles fotovoltaicos

La potencia entregada por los paneles fotovoltaicos en kW está dada por:

$$P_{PV} = Y * f \left(\frac{G_T}{G_{TSC}} \right) \left(1 + \alpha_p (T_C - T_{C,SC}) \right) \quad (2.2)$$

Y : Capacidad nominal del arreglo de paneles [kW]

f : Factor de reducción respecto a la ubicación

G_T : Radiación solar incidente sobre los paneles [kW/m²]

G_{TSC} : Radiación solar incidente a condiciones estándar [kW/m²]

α : Coeficiente de temperatura [%/°C]

T_C : Temperatura de celda del panel [°C]

$T_{C,SC}$: Temperatura de celda del panel a condiciones estándar [°C]

Potencia de carga/descarga de las baterías

La potencia de carga de las baterías en kW se define como:

$$P_{c-BESS} = \frac{-kcQ_{max} + kQ_1e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 - e^{-k\Delta t})} \quad (2.3)$$

La potencia de descarga de las baterías en kW está dada por:

$$P_{d-BESS} = \frac{kQ_1e^{-k\Delta t} + Qkc(1 - e^{-k\Delta t})}{1 - e^{-k\Delta t} + c(k\Delta t - 1 + e^{-k\Delta t})} \quad (2.4)$$

k : Tasa constante

c : Tasa de capacidad

Q_{max} : Capacidad máxima teórica de almacenamiento [kWh]

Q_1 : Energía disponible [kWh]

Q : Energía almacenada [kWh]

2.6.3 Datos de entrada para el diseño en HOMER Pro

2.6.3.1 Fuentes de energía renovable

Corresponde a la información climática de los valores de irradiación solar global horizontal en kW/m² y temperatura del ambiente en °C en cada paso de tiempo (véase sección 2.6.1.2).

2.6.3.2 Perfil de carga eléctrica

El consumo energético requerido por la planta OI se especificó en una planilla de consumo en kW por cada hora a lo largo de todo el año. Debido al requerimiento de funcionamiento continuo de la planta de 6 horas al día, el consumo energético fue repetitivo para los 365 días. El horario de funcionamiento fue definido de 9:00 am hasta las 15:00 pm, en base al mes de junio, el cual es considerado como el de menor irradiancia solar promedio (véase Figura 2.5).

2.6.3.3 Componentes

A continuación, se describen las características de los componentes comerciales seleccionados para el diseño del sistema de potencia. Cabe mencionar que, el precio de los mismos posee un incremento del 50 %, debido a la importación desde el mercado internacional.

Paneles fotovoltaicos

Se trata de paneles tipo monocristalino JAM72S20-450/MR de la marca JA Solar:

Tabla 2.10 Información de los paneles fotovoltaicos (JA Solar, 2021)

Capacidad [kW]	Temperatura operación [°C]	Eficiencia [%]
0.45	45	20.3
Coeficiente de temperatura [%/°C]	Costo capital [USD]	Vida útil [años]
-0.350	295.00	25

Adicionalmente, el factor de reducción de eficiencia fue del 90 %, debido a la degradación por exposición al ambiente.

Baterías

Corresponde a baterías estacionarias 12 OPzV solar.power 1500 de la marca Hoppecke:

Tabla 2.11 Información de las baterías (Hoppecke, s.f)

Voltaje nominal [V]	Capacidad nominal [kWh]	Capacidad máxima [Ah]
2	4.02	2010
Eficiencia ida/vuelta [%]	Costo capital [USD]	Estado mínimo de carga [%]
85	1,165.00	20

Inversor

Se trata del inversor Sunny Island 4.4M de la marca SMA Solar Technology AG:

Tabla 2.12 Información del inversor (SMA Solar, 2022)

Capacidad [kW]	Costo capital [USD]	Vida útil [años]	Eficiencia [%]
15	13,500.00	10	96

Regulador/Controlador de carga microrred

La estrategia de despacho que sigue el controlador de microrred para satisfacer la energía requerida es “carga siguiente” (LF, por sus siglas en inglés), este posee un costo capital estimado por el software de \$30,000.

Cabe mencionar que, debido a la naturaleza de los componentes electrónicos, estos requieren un nulo costo de mantenimiento.

2.6.3.4 Costos fijos

Se estimó un costo permanente de ejecución del proyecto de \$94,250.00 representado por los costos de controladores de carga de paneles fotovoltaicos, costos de montaje, instalación y traslado de equipos, construcción de estructuras y demás costos para la ejecución de la obra.

2.7 Sistema de aprovechamiento energético

La producción de hidrógeno como forma de aprovechar los excedentes de energía del sistema de potencia estuvo ligada a la utilización de un electrolizador PEM tipo comercial que tenga la capacidad de consumir la mayor cantidad de energía dada por el controlador microrred de HOMER Pro.

Para determinar el comportamiento del electrolizador se emplearon los valores experimentales dados por el fabricante de potencia consumida en kW y producción de hidrógeno en Nm³/h o kg/h, así como los valores de voltaje en V y corriente en A, que describen el comportamiento electroquímico de las celdas.

La eficiencia energética de un electrolizador que describe su desempeño está dada por (Siemens Energy, 2021):

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{m}_{H_2} * LHV}{P_{elec}} \quad (2.5)$$

\dot{m}_{H_2} : Flujo másico de hidrógeno producido [kg/h]

LHV: Poder calorífico inferior del hidrógeno [kWh/kg]

P_{elec} : Potencia eléctrica consumida [kW]

Se emplea el LHV debido a que el hidrógeno es luego reutilizado en la producción de energía.

El agua utilizada para el proceso de electrólisis debe tener una calidad de grado 1 para uso analítico en laboratorio, según la norma ISO 3696. Donde el proceso básico de pretratamiento se basa en el ablandamiento, para remover

el calcio e impurezas duras que ocasionen el envejecimiento del equipo, y eliminación de impurezas gaseosas.

Cabe mencionar que el sistema de almacenamiento y conversión de hidrógeno asume el almacenamiento del hidrógeno en un tanque a presión y su conversión mediante una celda de combustible PEM. Por ello, se consideró una eficiencia constante del 50 % para determinar la energía eléctrica de retorno (Siemens AG, 2016; EH Group, 2022) .

2.8 Simulación del sistema integrado

Mediante el uso de Simulink de Matlab se procedió a modelar cada sistema con ecuaciones representativas para verificarlos empleando la información de los fabricantes. Luego fueron integrados en un solo modelo y este se validó con base al trabajo de Kianfard et al. (2018), el cual posee como diferencia un sistema de potencia basado en un Ciclo Orgánico de Rankine (ORC).

A partir de la matriz de resultados del SFA diseñado se realizó la lectura de los datos de potencia de carga AC de la planta OI y los excesos de potencia existentes para el electrolizador. Después de configurar el arreglo de membranas, la implementación del sistema OI estuvo dada por la inclusión de la bomba de alta presión que brinda el caudal de alimentación.

A pesar de que se obtuvieron los datos por cada hora del año meteorológico típico, la simulación fue realizada por día con el fin de obtener un ahorro computacional. Así, se obtuvo la cantidad de agua desalinizada, hidrógeno y energía eléctrica equivalente a la red de la comunidad, mediante la conversión de hidrógeno, por día para ser agrupada mensualmente. A partir de ello, empleando la entalpía en cada estado termodinámico con base al análisis energético se estudió la eficiencia de los componentes principales y del sistema integrado, considerando inicialmente la generación de permeado, luego la producción de permeado e hidrógeno y finalmente la obtención de permeado y energía equivalente del hidrógeno, para comparar su desempeño respecto al aprovechamiento de los recursos energéticos.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Dimensionamiento del sistema de membranas OI

El modelado y simulación del arreglo de membranas realizado en Simulink de Matlab se detalla en el Apéndice A, y a continuación, se resumen los resultados principales.

El análisis empieza considerando el tipo de membrana a utilizar, por ello en la Tabla 3.1 se muestra las características de la membrana SWC5-LD-4040 marca Hydranautics, que soporta las condiciones del agua salobre.

Tabla 3.1 Especificaciones de la membrana OI (Hydranautics, 2021)

Característica	Descripción
Área activa S_e	7.9 m ²
Rechazo de sal promedio R_s	99.5 %
Presión máxima de operación $P_{f,max}$	8.27 MPa (82.74 bar)
Temperatura máxima de operación $T_{w,max}$	45 °C
Recuperación máxima del elemento Y_{max}	15 %
Caída máxima de presión operacional ΔP_{max}	0.069 MPa (0.69 bar)

Comercialmente este tipo de membrana puede ser ubicado en un máximo de 6 unidades en serie en el porta-membranas y de acuerdo con Dow (2018) un sistema de paso y etapa única puede tener una recuperación entre el 40 % al 60 % de forma que es adaptable al sistema propuesto (véase sección 2.3.1).

Inicialmente se consideró un arreglo de 6 membranas en serie en 1 porta-membrana, sin embargo, no cumplió con el caudal de permeado requerido y la recuperación fue excesivamente alta a diferentes presiones. Así, se procedió de forma iterativa fijando la presión y el caudal de alimentación hasta obtener un sistema con una recuperación mayor al 50 %, para requerir como máximo una alimentación de 6 m³/h mediante un arreglo de 2 tubos de presión con 6 membranas cada uno en serie.

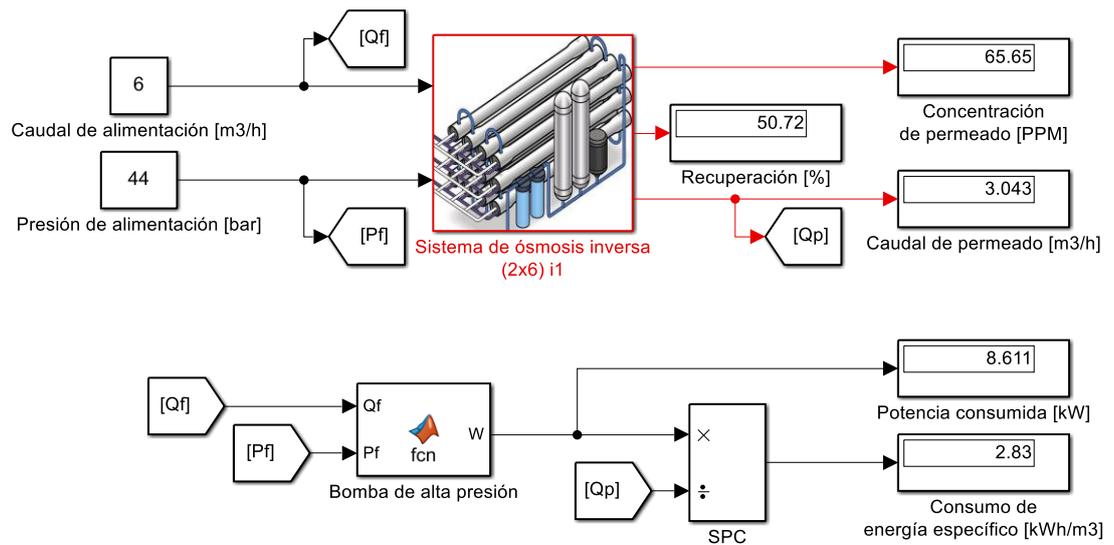


Figura 3.1 Modelo Simulink del sistema de membranas

La configuración del sistema a una presión constante de 5 MPa de alimentación se muestra en la Tabla 3.2, del cual se observa que si se incrementa la alimentación existirá un mayor desperdicio de agua, o de lo contrario las membranas podrían deteriorarse más rápido.

Tabla 3.2 Sistema de membranas 2x6 a 5 MPa

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Caudal de alimentación mínimo	Q_f	m ³ /h	6.3
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.47
Concentración de permeado	C_p	ppm	67.82
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	2.96
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	55.11
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	10.04
Tasa de recuperación elemento 6	Y_6	%	15.2

Por otra parte, la configuración bajo una alimentación constante de 6 m³/h se presenta en la Tabla 3.3, de la cual se obtuvo un menor desperdicio y consumo de energía específico, sin necesidad de que las membranas operen al límite, asegurando un flujo constante de agua dulce.

Tabla 3.3 Sistema de membranas 2x6 a 6 m³/h

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Presión de alimentación mínima	P_f	MPa	4.4
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.04
Concentración de permeado	C_p	ppm	65.65
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	2.83
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	50.72
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	9.24
Tasa de recuperación elemento 6	Y_6	%	13.13

Cabe mencionar que, al tratar de reducir el número de membranas a 5 se encontró que las últimas membranas trabajan al límite y el consumo de energía específico se incrementa en un 15 %. Finalmente, la corrección de los parámetros del sistema OI se describe en la Tabla 3.9, debido al acoplamiento con el sistema de bombeo.

3.2 Dimensionamiento del sistema hidráulico

3.2.1 Tuberías y accesorios

Dow (2018) menciona que para agua salobre con concentración en SDT superior a 7000 ppm, se sugiere emplear tuberías de material 904L. En la Tabla 3.4 se indican las denominaciones de las tuberías para cada tramo.

Tabla 3.4 Líneas de tubería para cada tramo

Tramo	Descripción
A	1 1/2" CED 40
B	1 1/2" CED 40
C	1" CED 40 ; 3/4" CED 40
D	1" CED 40 ; 1/2" CED 40
E	1" CED 40 ; 3/4" CED 40

Hay que considerar que los diámetros de tubería permiten una velocidad del fluido de 1.5 m/s para evitar el deterioro de la película pasiva. Los accesorios requeridos se detallan en la Tabla A.11.

3.2.2 Sistema de bombeo

Se compone de una bomba para extraer el agua salobre del pozo y una bomba para enviar el agua salobre pretratada a las membranas OI.

Tabla 3.5 Sistema de bombeo de la planta OI

Modelo	Aplicación	Caudal [m ³ /h]	Cabezal [m]	Eficiencia [%]	Potencia [kW]	NPSH [m]
EVMSL5 4N6Q1BEG/1.	Baja presión	6	43.74	61	1.17	2.76
APP 6.5	Alta presión	5.8	448.7	87	9.5	20

3.2.3 Sistema de almacenamiento de agua

El reservorio de agua de salobre requiere de un volumen operativo de 36 m³ para garantizar el pretratamiento y la alimentación de 6 m³/h al sistema OI, mientras que, el tanque de agua potable requiere de 18 m³ para asegurar el postratamiento y almacenamiento de 3 m³/h, durante las 6 h.

Tabla 3.6 Sistema de almacenamiento de la planta OI

Tipo	Diámetro [m]	Altura [m]	Capacidad nominal [m ³]	Capacidad operativa [m ³]
Alimentación	4	3	37.7	36
Producto	3	3	21.2	18

Cabe mencionar que estos tanques deben ser construidos en el lugar según la norma API 650, debido a que resultaría complicado su traslado.

3.3 Sistema fotovoltaico autónomo (SFA)

3.3.1 Demanda energética de la planta OI

El sistema de bombeo tiene una potencia de consumo de 10.67 kW, pero considerando el uso de equipos auxiliares de control alcanza un requerimiento de 11 kW.

3.3.2 Simulación en HOMER Pro

Los resultados del SFA se muestran en la Tabla 3.7. La alta vida útil de las baterías se da porque casi no se descargan en su totalidad y los excesos de energía representan la fracción no utilizada durante el año. El detalle de estos valores se desglosa en el Apéndice B.

Tabla 3.7 Resultados del sistema fotovoltaico autónomo

Parámetro	Valor
Número de paneles / capacidad total [kW]	52 / 23.4
Número de baterías / capacidad total [kWh]	48 / 193
Autonomía [h]	56.1
Tiempo de vida esperado [años]	61.1
Potencia del inversor [kW]	15
Excesos de energía [%]	24.8

3.3.3 Producción y demanda energética

A pesar de que la configuración presentada en la Tabla 3.7 fue la óptima por parte del software, en la Figura 3.2 se visualizan el desperdicio energético del sistema de potencia.

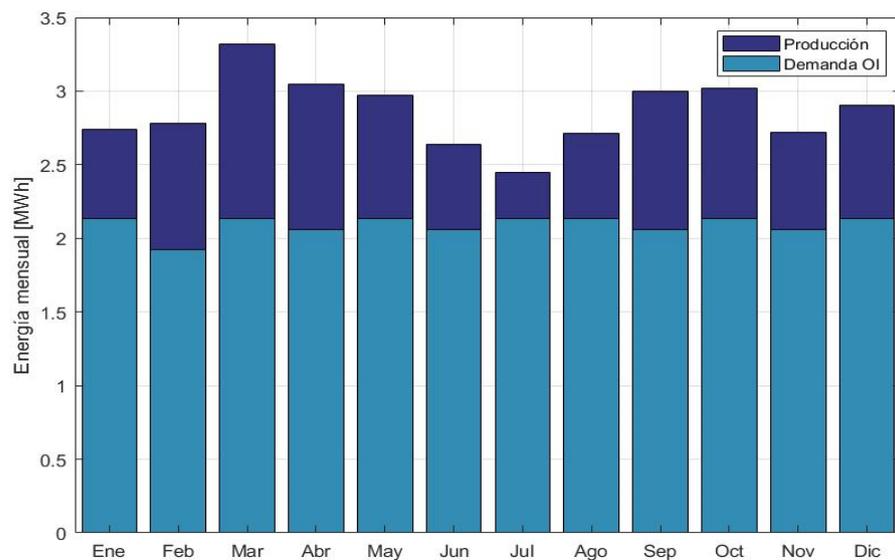


Figura 3.2 Producción y demanda OI mensual de energía

Específicamente, el total de energía producida por el SFA fue de 34.3 MWh/año, pero la demanda de la planta OI tan solo alcanzó los 25.1 MWh/año, y por ello surge la necesidad de utilizar el hidrógeno como vector energético.

3.4 Sistema de producción de hidrógeno

La simulación del SFA indica que los excesos de producción eléctrica alcanzan un máximo de 14.5 kWh y un promedio de 4.3 kWh. Por ello, se seleccionó un electrolizador PEM H-tec S 30/50 de potencia nominal 5 kW, sus características se hallan en la Tabla 3.8 (H-tec Systems, 2021).

Tabla 3.8 Características del electrolizador H-Tec S 30/50 (H-tec Systems, 2021)

Parámetro	Símbolo	Unidad	Puntos de operación		
Potencia consumida	P_{elec}	kW	1.28	5	9.38
Producción de hidrógeno	\dot{m}_{H_2}	kg/h	0.0283	0.0988	0.1408
Producción de hidrógeno	Q_{H_2}	Nm ³ /h	0.31	1.1	1.57
Eficiencia energética	η_{elec}	%	73.6	65.8	50

Para modelar la producción de hidrógeno, la energía empleada y el consumo de agua en el proceso se emplearon las curvas de operación de la Figura C.4 y Figura C.5.

3.5 Sistema integrado

El modelo del sistema integrado se muestra la Figura 3.3. En las simulaciones realizadas por día, el SFA brinda el suministro eléctrico de 9.5 kWh a la bomba de alta presión y esta entrega un flujo de alimentación de 5.78 m³/h a 4.4 MPa sobre las membranas OI, así fue posible determinar la recuperación del sistema, la concentración y producción de permeado.

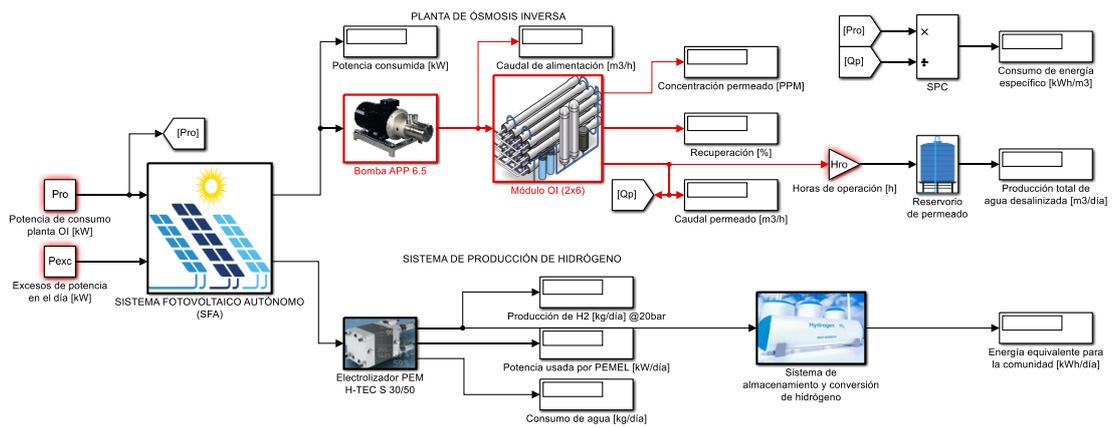


Figura 3.3 Modelo Simulink del sistema integrado

Producción de agua desalinizada

La producción de agua dulce alcanzó los 18.05 m³, permitiendo satisfacer la necesidad de las 150 personas diariamente. En la Tabla 3.9 se indican los parámetros corregidos del sistema luego de incluir la bomba de alta presión.

Tabla 3.9 Parámetros de operación del sistema OI

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Caudal de alimentación	Q_f	m ³ /h	5.78
Presión de alimentación	P_f	MPa	4.4
Concentración de alimentación	C_p	ppm	10000
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.008
Presión de permeado	P_p	kPa	101.32
Concentración de permeado	C_p	ppm	66.28
Caudal de concentrado	Q_c	m ³ /h	2.77
Presión de concentrado	P_c	MPa	4.24
Concentración de concentrado	C_c	ppm	20770
Tasa de recuperación	Y	%	52.03
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	3.17

Cabe señalar que el consumo específico clasifica al sistema OI como uno de mediana escala. Teniendo en cuenta la extracción del agua salobre, el consumo alcanza los 3.66 kWh/m³. Al considerar las etapas de tratamiento y gestión de la salmuera, un consumo más realista de la planta sería de 4.8 kWh/m³, según lo detallado en el Apéndice A en base a Voutchkov (2018).

Producción de hidrógeno

La generación de hidrógeno durante los días de cada mes que se visualiza en la Figura 3.4 indica que el proceso de electrólisis es vulnerable durante el mes de julio, debido a la baja disponibilidad del recurso solar y el controlador microrred prioriza el requerimiento energético de la planta, por tanto, no existen excedentes de energía significativos que aprovechar.

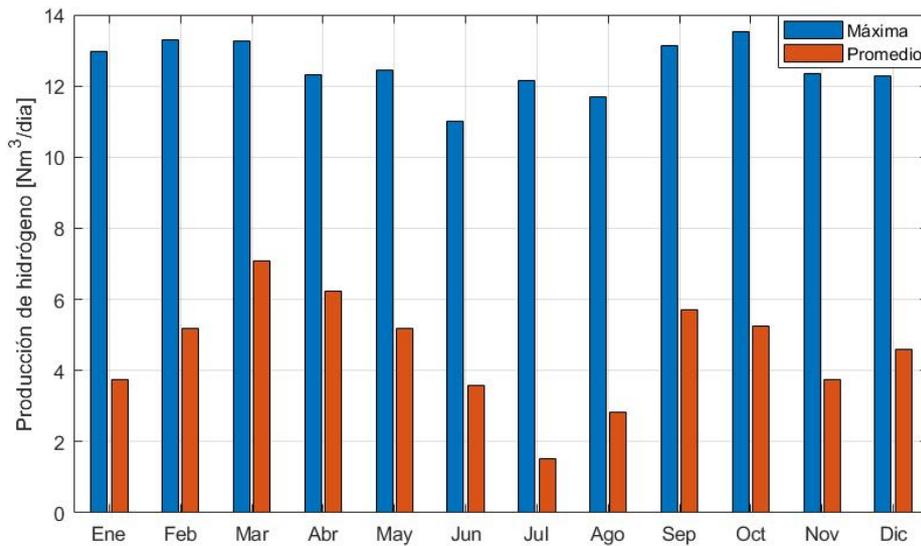


Figura 3.4 Producción máxima y promedio mensual de hidrógeno

Con ello, la producción máxima de un día resultaría en 13.5 Nm³, que es útil conocer para dimensionar el sistema de almacenamiento. Además, la energía total utilizada a partir de los excedentes, de 8.52 MWh al año, para la generación de hidrógeno alcanzó los 8.13 MWh. Por otra parte, en la Figura 3.5 se observa que el requerimiento de agua para el proceso de electrólisis no supera los 0.1 m³/mes aun considerando las pérdidas durante su tratamiento.

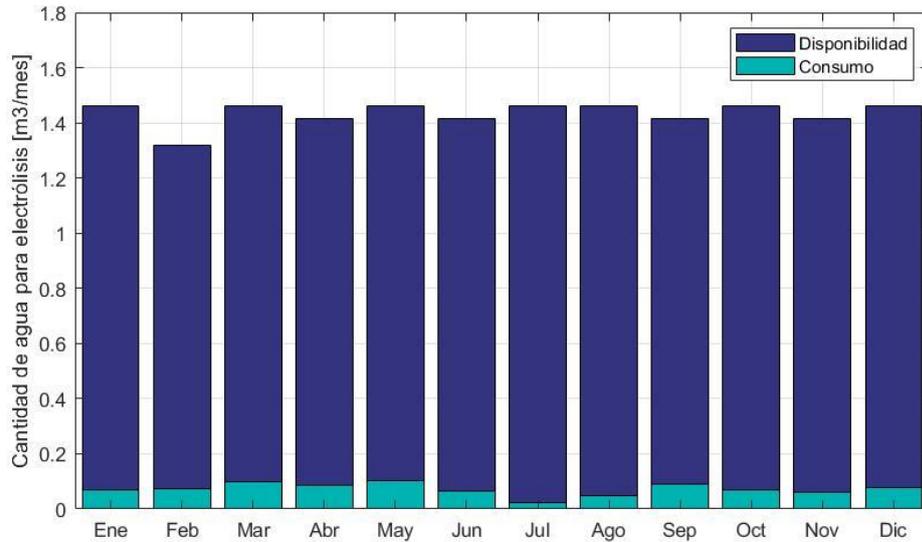


Figura 3.5 Requerimiento de agua fresca para electrólisis

El beneficio de emplear el hidrógeno como vector energético se ilustra en la Figura 3.6, donde se denota una alta convergencia entre la producción eléctrica y la demanda del sistema integrado, la cual alcanzó los 33.2 MWh/año.

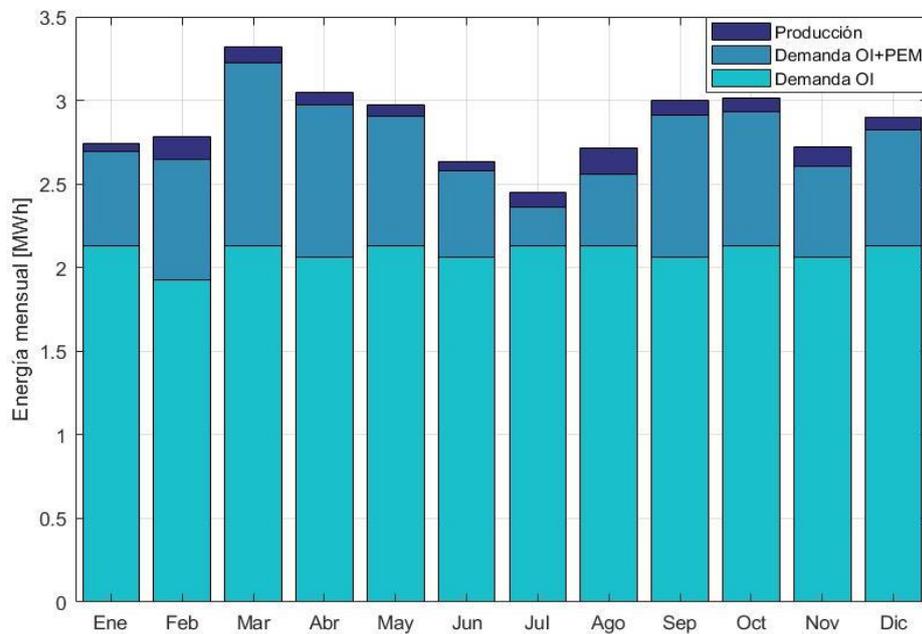


Figura 3.6 Producción y demanda OI+PEM mensual de energía

Proyección de la energía disponible para la comunidad

El proceso de conversión del hidrógeno almacenado tiene el potencial de brindar un suministro eléctrico de acuerdo con la Figura 3.7.



Figura 3.7 Energía equivalente mensual del hidrógeno

Esta energía disponible puede proveer de electricidad al centro comunitario de la zona ante un requerimiento mensual de 130 kWh, el cual es un valor promedio en la Región Costa. Así, la producción anual de electricidad podría alcanzar un valor de 2.5 MWh.

Eficiencia energética de la planta OI y electrolizador PEM

La eficiencia promedio de los equipos principales durante cada mes se presenta en la Tabla 3.10. En general, el sistema OI tuvo una eficiencia constante debido a que la temperatura del agua de alimentación presenta variaciones insignificantes, mientras que, la eficiencia energética del electrolizador mantiene dentro del rango indicado por el fabricante del 50 % al 73.6 %.

Tabla 3.10 Eficiencia energética del la planta OI y del electrolizador PEM

Mes	Eficiencia planta OI [%]	Eficiencia electrolizador PEM [%]
Enero	52.3	62.1
Febrero	52.3	60.8
Marzo	52.3	60.3
Abril	52.3	61.9
Mayo	52.3	62.7
Junio	52.3	62.5
Julio	52.3	61.8
Agosto	52.3	61.6
Septiembre	52.3	60.6
Octubre	52.3	60.9
Noviembre	52.3	62.0
Diciembre	52.3	61.6

Eficiencia energética general del sistema

El sistema integrado, que posee como suministro la energía proveniente del SFA y el agua salobre, fue estudiado considerando inicialmente como producto el agua desalinizada, luego el permeado y el hidrógeno y finalmente el permeado y la energía eléctrica equivalente del hidrógeno. Los incrementos en la eficiencia energética del sistema se aprecian en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Comparación de eficiencia energética con aprovechamiento

Mes	Eficiencia I [%]	Eficiencia II [%]	Incremento [%]	Eficiencia III [%]	Incremento [%]
Enero	51.2	52.2	2.0	51.7	1.0
Febrero	50.8	52.2	2.8	51.5	1.4
Marzo	50.4	52.3	3.8	51.3	1.8
Abril	50.6	52.3	3.4	51.5	1.8
Mayo	50.9	52.3	2.8	51.6	1.4
Junio	51.2	52.2	2.0	51.7	1.0
Julio	51.7	52.1	0.8	51.9	0.4
Agosto	51.3	52.2	1.8	51.8	1.0
Septiembre	50.5	52.2	3.4	51.4	1.8
Octubre	50.7	52.3	3.2	51.5	1.6
Noviembre	51.1	52.2	2.2	51.7	1.2
Diciembre	51.0	52.3	2.5	51.6	1.2

De forma que el incremento de la eficiencia energética alcanza un valor promedio de 2.6 % y es proporcional al nivel operativo del electrolizador.

3.6 Análisis técnico y económico

3.6.1 Planta OI

Dentro del dimensionamiento del sistema de ósmosis inversa, se identificaron varios equipos y accesorios que permiten determinar el costo de la planta. Se debe considerar que no se trata de una lista detallada, ya que existen otros accesorios menores.

Tabla 3.12 Equipos y accesorios del sistema OI

Descripción	Marca	Modelo	Cant.	UM	Precio [USD]
Bomba de alta presión	Danfoss	APP 6.5	1	un	17,000.00
Bomba baja presión	Ebara	EVMSL5 4/1.5	1	un	1,700.00
Portamembranas OI	Protect	PRO-4-1000-EP-6	2	un	3,200.00
Membrana OI	Hydranautics	SWC5-LD-4040	12	un	5,088.00
Tubería (1 ½", 1", ¾", ½")	Comfit	904L	57	m	2,593.00
Codos de 90° (1 ½", 1", ½")	Comfit	316	10	un	144.25
Unión Tee (1")	Comfit	316	3	un	45.00
Acoples flexibles (1 ½", 1")	Victaulic	Estilo 177N y 77	23	un	54.00
Válvula de mariposa (1 ½")	Bray	Serie 3W/3L	1	un	900.00
Válvula de bola (1")	Bray	Serie 5000/6000	2	un	1,500.00
Válvula de retención (1 ½")	Genebre	REGE	2	un	80.00
Válvula de alivio (1 ½")	Genebre	Accesorios	2	un	260.00
Manómetro	Ametek USG	Accesorios	5	un	75.00
Presostato	Danfoss	Accesorios	2	un	110.00
Tanque de agua potable	-	-	1	un	10,000.00
Total					42,749.00

En la Tabla 3.13 se especifica el costo total del sistema OI, considerando que se adicionan en mano de obra un 20 %, transporte un 15 %, imprevistos un 10 % y en obra civil un 40 %, del subtotal calculado en la Tabla 3.12. Cabe indicar que, estos porcentajes fueron sugeridos por parte de una empresa dedicada al diseño e instalación de sistemas de ósmosis inversa industrial, cuyo nombre se prefiere mantener reservado.

Tabla 3.13 Costos de la planta OI

Descripción	Precio [USD]
Equipos y accesorios	42,749.00
Mano de obra	8,549.80
Transporte	6,412.30
Imprevistos	4,274.90
Obra civil	17,099.60
Total	79,086.00

3.6.2 SFA y producción de hidrógeno

En la Tabla 3.14 se muestra el precio de los componentes del sistema de potencia, donde el costo fijo corresponde a los controladores de carga solar, costos de montaje, instalación y traslado de equipos, construcción de estructuras y demás costos para la ejecución de la obra. Mientras que, los accesorios del sistema de producción de hidrógeno corresponden a Otros.

Tabla 3.14 Costos del SFA y sistema de generación de hidrógeno

Descripción	Marca	Modelo	Cantidad	Precio [USD]
Sistema de potencia				
Panel solar	JA Solar	450	52	15,327.03
Baterías	Hoppecke	12 OPzV	48	55,920.00
Inversor	Sunny island	4.4M	1	13,500.00
Controlador microrred	-	-	1	30,000.00
Costo fijo	-	-	-	94,250.00
Total				208,997.00
Sistema de producción de hidrógeno				
Electrolizador PEM	Htec	Series 30/50	1	180,000.00
Otros	-	-	-	10,000.00
Total				190,000.00

3.6.3 Costos de capital del sistema integrado

Finalmente, se resumen los costos para implementar el sistema integrado:

Tabla 3.15 Resumen de costos

Sistema	Costo [USD]	Porcentaje [%]
Planta de ósmosis inversa	79,086.00	16.6
Sistema fotovoltaico autónomo	208,997.00	43.7
Sistema de producción de hidrógeno	190,000.00	39.7
Total	478,083.00	100

El mayor porcentaje de costos corresponde al SFA debido a los altos costos fijos que incurren para su implementación, por ende, se requiere analizar a detalle sobre los costos de montaje, instalación, logística y de obra civil en la zona. Mientras que, el elevado costo del sistema de generación de hidrógeno surge debido a que no es una tecnología común en el mercado.

3.6.4 Costos operativos del sistema integrado

Para la operación de la planta se requiere de consumibles que corresponden a los productos químicos como el antiincrustante utilizado en la etapa de pretratamiento, y anticorrosivo, solución de cloro, regulador de pH usados en el postratamiento. Mientras que, el costo de mantenimiento hace referencia a limpieza de las membranas OI y del electrolizador, así como del cambio de elementos filtrantes. Aunque no se conoce con exactitud la composición del agua desalinizada, se han asumido los gastos que incurren para el funcionamiento de la planta, según la guía brindada por la empresa antes indicada, y se presentan en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Costos operativos

Detalle	Costo anual [USD]
Consumibles en etapas de tratamiento	400.00
Mantenimiento	650.00
Total	1,050.00

3.7 Análisis del impacto ambiental

3.7.1 Ahorro potencial en generación de CO₂ y consumo de combustible

Un sistema de potencia alterno para la planta OI pudo estar basado en motores de combustión interna, los cuales son tradicionales en este tipo de sistemas. A continuación, se evalúa las emisiones de CO₂ y el gasto en combustibles que se lograría evitar. Para ello fue necesario seleccionar un motor estacionario a gasolina LC196FD de la marca Loncin, sus características se muestran en la Tabla 3.17 (Loncin Motor Co., 2019).

Tabla 3.17 Características del motor estacionario LC196FD

Potencia nominal [kW]	Consumo de combustible [g/kWh]	Emisiones de CO ₂ [g/kWh]
13	374	853.39

El impacto ambiental negativo que se tendría al usar un sistema tradicional de energía basado en combustibles fósiles para satisfacer la demanda de la planta OI y la producción de energía para la comunidad se señala en la Tabla 3.18, considerando el precio del combustible en \$2.4 por galón, así como una densidad promedio de la gasolina de 740 kg/m³.

Tabla 3.18 Resumen del impacto ambiental en el suministro eléctrico

Aplicación	Consumo de combustible [gal/día]	Ahorro en combustible [USD/mes]	Emisiones de CO ₂ [t/año]
Planta OI	10.4	650	24.3
Centro comunitario	0.6	43	2.6
Total	11	693	27

3.7.2 Gestión del agua de rechazo

En el Apéndice A, se describe sobre el método de descarga al mar el cual es comúnmente utilizado para la gestión de la salmuera, sin embargo, para su aplicación se debe cumplir con el Anexo 1 de la Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes (MAE, 2015).

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

La propuesta de un sistema fotovoltaico autónomo fue el adecuado ya que consigue aprovechar el recurso solar disponible de la zona y garantiza un suministro eléctrico confiable a la planta para brindar agua potable al 25 % de la población sin complicaciones en un año típico.

Al considerar la demanda energética de la planta, se determinó que el suministro eléctrico fue respaldado en un 84.15 % por los paneles fotovoltaicos, mientras que el 15.85 % fue abastecido por las baterías.

El sistema de ósmosis inversa tiene la fortaleza llevar a cabo el proceso de desalinización del agua salobre con el menor consumo específico de energía posible. Mientras que, la protección de la vida útil de los componentes involucrados, como las membranas que son una parte esencial, está garantizada por el desarrollo del modelo “elemento a elemento” que permite controlar que los parámetros de diseño no excedan los límites operativos recomendados respecto a la tasa de recuperación, presión y caudal de alimentación.

El aprovechamiento de los excedentes de energía a través de la producción de hidrógeno permitió mejorar el acoplamiento entre la demanda energética de la planta OI y la energía entregada por el sistema de potencia. La flexibilidad del electrolizador PEM empleado para la generación de hidrógeno mediante un funcionamiento altamente dinámico, permitió la reducción del desperdicio del 24.8 % de la energía total generada por el SFA anualmente a un 1.1 %.

Cabe indicar que, con el aprovechamiento de los excesos de energía en la producción de hidrógeno la eficiencia general del sistema aumentó en un máximo de 3.8 %. A través de la estimación de la energía eléctrica equivalente

provisto por el hidrógeno luego de su conversión, se halló que el incremento máximo en la eficiencia global podría ser del 1.8 %. Aunque no resultó tan elevado, el mayor beneficio está dado por la posibilidad de proveer de suministro eléctrico en pequeña escala a la zona, especialmente al centro comunitario para impulsar actividades sociales y turísticas.

El uso de energías renovables para energizar la planta de desalinización y proveer de suministro eléctrico a la comunidad permitiría obtener un importante porcentaje de reducción de emisiones, a diferencia de usar energía proveniente de combustibles fósiles.

El dimensionamiento de la planta tuvo la limitante de no considerar las etapas de tratamiento del agua, por ende, el consumo específico del agua potable requiere de una mayor cantidad de energía para su producción. Mientras que, la proyección de la energía equivalente mediante el hidrógeno almacenado solo consideró la eficiencia de la celda de combustible y por ello la energía disponible podría reducirse, debido a la gestión del almacenamiento del elemento.

A pesar de que el sistema OI posee un diseño estándar para un funcionamiento que considera la temperatura del agua salobre como constante, la asunción de este valor resultó válida, debido a que la eficiencia energética del sistema OI se muestra invariable en un 52.3 %.

En cuanto a la parte financiera, se determinó que el SFA representa el mayor porcentaje de la inversión requerida, debido a que una gran parte se destina a su implementación en la zona. Por ende, se requiere un análisis financiero más profundo sobre estos valores asumidos.

Por último, la simulación del sistema integrado en diferentes escenarios permitió obtener un modelo generalizado y replicable para otros tipos de similares características, donde se obtenga su información meteorológica y características del agua salobre. Además que, permitiría agilizar la validación de propuestas de diseño en distintas configuraciones según la necesidad.

4.2 Recomendaciones

En el presente proyecto se empleó múltiples asunciones para el modelado de los sistemas las cuales deben ser verificadas, una de las más críticas ha sido la caracterización básica del agua salobre, de la cual en realidad se requiere de un análisis fisicoquímico que detalle su composición, a fin de que se pueda complementar el diseño con la inclusión de las etapas de pretratamiento y postratamiento del agua que garanticen su calidad final. Además, con un estudio demográfico se podría consensuar la ubicación de la planta para desarrollar un plan estratégico minucioso sobre la gestión de los residuos.

Con la intención de buscar mejoras en optimización del diseño del sistema OI, es posible hacer uso del software Wave del fabricante de equipos de ósmosis inversa Dupont, debido a que permite obtener resultados precisos a partir del análisis de las propiedades fisicoquímicas del agua a tratar.

Además, es sugerible evaluar el horario de funcionamiento en diferentes escenarios para garantizar un óptimo aprovechamiento del recurso solar y examinar la reducción del número de baterías utilizadas, ya que estas solo se descargan casi en su totalidad durante los meses de junio y julio.

Es necesario considerar que una fracción de los excesos de energía se encontraron fuera del rango de operación del electrolizador PEM seleccionado y por ende no fueron aprovechados. Por tanto, se sugiere realizar un análisis de costo-beneficio para determinar el arreglo de electrolizadores PEM de baja escala que permita consumir la mayor cantidad de energía no utilizada sin elevar drásticamente el costo requerido.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdul, A., Lau, K., Low, S., & Azeem, B. (2021). Multicomponent Spiral Wound Membrane Separation Model for CO₂ Removal from Natural Gas. *Membranes* 2021. <https://doi.org/10.3390/membranes11090654>.
- Asociación Usuarios del Manglar Cerrito de los Morreños. (2010). *Plan de Manejo para la concesión de 10.823,94 has de manglar en el Estuario Interior Central del Golfo de Guayaquil, Puerto Libertad - Cerrito de los Morreños - Santa Rosa*. Gobierno Provincial del Guayas, Fundación Cerro Verde, Fundación Schutzwald, Fundación Ambientar, Fundación Balsa Ecuatoriana - JP.
- Danfoss. (2019). Instrucciones. Bombas APP 0.6-46. *Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento*. <https://assets.danfoss.com/documents/195907/AQ213186503082es-001102.pdf>.
- Danfoss. (2021). Hoja de datos. *Bombas APP 0.6-46 / APP (W) 5.1-10.2*. <https://assets.danfoss.com/documents/192803/AI274333290009es-000801.pdf>.
- Dow. (2018). Technical Manual. *FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes*. Form No. 609-00071-0416.
- Ebara. (2022). Ficha técnica Bomba Vertical Multi etapas.
- EH Group. (2022). PEM Fuel Cell Stack & System. *EH Fuel Cell Technology*. <https://www.ehgroup.ch/products>.
- Eke, J., Ahmed, Y., Giwa, A., & Sodiq, A. (2020). The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114633>.
- Fountain, H. (2019). ¿Cuánto cuesta desalinizar el agua que necesita el mundo? *The New York Times*.
- García, A. (2019). *Cerrito de los Morreños, en la vida real y en la ficción*. Obtenido de <https://www.elcomercio.com/tendencias/cerrito-morrenos-libro-manglar-piratas.html>
- Google. (s.f.). *[Localización de "Cerrito de los Morreños" en Google Earth]*. Obtenido de earth.google.com
- HOMER Energy. (2020). *Introducción, cálculos y glosario*. Obtenido de HOMER Pro 3.14 User Manual: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.14/index.html>

- Hoppecke. (s.f). *OPzV solar.power. Valve regulated lead-acid batteries for cyclic applications.* https://www.europe-solarstore.com/download/hoppecke/opzv/OPzV_solar.power_en.pdf.
- H-tec Systems. (2021). *H-tec Series-S*. Obtenido de <https://www.h-tec.com/en/products/>
- Hydranautics. (2021). *Membrane element SWC5-LD-4040*. Obtenido de AquaQuote: https://aquaquote-imports-storage.s3.us-west-1.amazonaws.com/Catalog_Uploads/All+Membrane+Specs/SWC5-LD-4040.pdf
- INEN. (2011). *Agua potable. Requisitos* (Primera ed.). NTE INEN 1108:2011.
- INEN. (2013). *Agua para uso en análisis de laboratorio - Especificación y métodos de ensayo. (ISO 3696:1987(E), IDT)* (Primera ed.). NTE INEN-ISO 3696.
- IRENA. (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. *International Renewable Energy Agency*. Abu Dhabi.
- JA Solar. (2021). *470W MBB Half-Cell Module. JAM72S20 445-470/MR Series.* <https://www.jasolar.com/uploadfile/2021/0602/20210602105327260.pdf>.
- Kianfard, H., Khalilarya, S., & Jafarmadar, S. (2018). Exergy and exergoeconomic evaluation of hydrogen and distilled water production via combination of PEM electrolyzer, RO desalination unit and geothermal driven dual fluid ORC. *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.09.057>.
- Kikuchi, Y., Ichikawa, T., Sugiyama, M., & Koyama, M. (2019). Battery-assisted low-cost hydrogen production from solar energy: Rational target setting for future technology systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.119>.
- Kucera, J. (2010). *Reverse Osmosis: Design, Processes, and Applications for Engineers*. Hoboken: Wiley-Scrivener.
- Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 2. <https://doi.org/10.1016/j.mset.2019.03.002>.
- Lenntech. (2016). Surface water discharge of brine. *Brine treatment*. <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Surface-Water-Discharge-of-Brine.pdf>.
- Lenntech. (2017). Puntos Clave en Desalación. *Desalinización del agua de mar*. <https://www.lenntech.es/procesos/mar/general/desalacion-puntos-clave.htm>.
- Lienhard, J. (2017). *Thermophysical properties of seawater. Code version: 20 February 2017*. Obtenido de Web MIT: <http://web.mit.edu/seawater/>

- Loncin Motor Co., L. (2019). Published Engine CO2 Values. CO2. <https://www.loncinindustries.com/>.
- MAE. (2015). Anexo 1. Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua. *Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>.
- Markvart, T., & Castañer, L. (2012). *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications* (Segunda ed.). (A. McEvoy, T. Markvart, & L. Castañer, Edits.) Academic Press. doi:<https://doi.org/10.1016/C2011-0-05723-X>
- Meteonorm. (2010). *[Reporte sobre información climatológica de "Cerrito de los Morreños"]*.
- Meteotest. (s.f.). *Features*. Obtenido de Meteonorm: <https://meteonorm.com/en/meteonorm-features>
- Munson, B., Okiishi, T., Huebsh, W., & Rothmayer, A. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.
- Nayar, K., Sharqawy, M., Banchik, L., & Lienhard, J. (2016). Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.024>.
- OMS. (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. ISBN 978-92-4- 354995-8.
- Pellow, M., Emmott, C., Barnhart, C., & Benson, S. (2015). Hydrogen or batteries for grid storage? A net energy analysis. *Energy & Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/C4EE04041D>.
- Rasero, C. M. (2011). Energía solar fotovoltaica. *Energía solar fotovoltaica, situación actual, 4*. Recuperado el 29 de Junio de 2022
- Sánchez, M. (2019). Desarrollo y validación de un modelo para la simulación de sistemas de electrólisis alcalina para la producción de hidrógeno a partir de energías renovables. Madrid.
- SFA Soft. (2017). Resources Friction Loss Data. *Pump Calcs*. <http://www.metropumps.com/ResourcesFrictionLossData.pdf>.
- Sharqawy, M., & Lienhard, J. Z. (2010). Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2010.1079>.

- Siemens AG. (2016). PEM Fuel Cells: Modules and power plant. *SINAVY PEM Fuel Cell For Submarines*. Article No. VRMS-B10008-00-7600: <https://www.siemens.com/marine>.
- Siemens Energy. (2021). Efficiency - Electrolysis. White paper. *Hydrogen Solutions*. <http://siemens-energy.com/electrolyzer>.
- SMA Solar. (2022). *Sunny Island 4.4M / 6.0H / 8.0H - La solución más fiable para todas las necesidades: más sencillo que nunca*. <https://files.sma.de/downloads/SI44M-80H-13-DS-es-30.pdf>.
- Urquizo, J., Singh, P., Hidalgo, R., Villavicencio, V., & Soriano, G. (2019). Rehabilitation of Solar Home Systems and Sustainable Development for an Island Community in Ecuador. *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*. <https://doi.org/10.1109/GHTC46095.2019.9033014>.
- Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends. *Desalination*. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>.

APÉNDICES

APÉNDICE A – DISEÑO DEL SISTEMA OI

Parámetros de diseño

En la Tabla A.1, se resumen las ecuaciones de diseño empleadas para determinar el desempeño del sistema OI en base al método elemento a elemento y las definiciones de los símbolos en la Tabla A.3 (Dow, 2018).

Tabla A.1 Ecuaciones de diseño de membranas OI

$Q_{pi} = A_i S_E (TCF)(FF) \left[\left(P_{fi} - \frac{\Delta P_{fci}}{2} - P_{pi} \right) - (\bar{\pi}_i - \pi_{pi}) \right]$	(A.1)
$TCF = \begin{cases} \exp \left[2640 \left(\frac{1}{273} - \frac{1}{273 + T_w} \right) \right] & ; T_w \geq 25 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \exp \left[3020 \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T_w} \right) \right] & ; T_w < 25 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$	(A.2)
$\Delta P_{fci} = 0.0086 \left(\frac{Q_{fi} + Q_{ci}}{2} \right)^{1.7} = P_{fi} - P_{ci}$	(A.3)
$\pi_{fi} = \begin{cases} \frac{C_{fi}(T_w + 320)}{491000} & ; C_f \leq 20000 \text{ PPM} \\ \frac{0.0117 C_{fi} - 34}{14.23} \left(\frac{T_w + 320}{345} \right) & ; C_f > 20000 \text{ PPM} \end{cases}$	(A.4)
$\pi_{pi} = \pi_{fi} (1 - R_i)$	(A.5)
$\bar{\pi}_i = \pi_{fci} = \pi_{fi} \left(\frac{C_{fci}}{C_{fi}} \right) (CPF_i)$	(A.6)
$C_{fci} = C_{fi} \frac{\ln \left(\frac{1}{1 - Y_i} \right)}{Y_i}$	(A.7)
$CPF_i = \exp[0.7Y_i]$	(A.8)
$Y = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - Y_i) = \frac{Q_p}{Q_f}$	(A.9)
$C_{pi} = B_i (C_{fci}) (CPF_i) (TCF) \frac{S_E}{Q_{pi}}$	(A.10)

Adicionalmente, se describen las ecuaciones utilizadas para determinar los parámetros restantes en la Tabla A.2 (Kianfard et al., 2018).

Tabla A.2 Ecuaciones adicionales de diseño de membranas OI

$Q_{fi} = Q_{pi} + Q_{ci}$	(A.11)
$Q_{fi}C_{fi} = Q_{pi}C_{pi} + Q_{ci}C_{ci}$	(A.12)
$C_{pi} = C_{fi}(1 - R_i)$	(A.13)
$A_i = A = 0.0246 * \frac{18.6865 - (0.177C_c/1000)}{T_w + 273}$	(A.14)
$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{pi}C_{pi}}{Q_p}$	(A.15)
$Q_p = \sum_{i=1}^n Q_{pi}$	(A.16)

Tabla A.3 Definiciones de símbolos

<i>i</i>	Elemento <i>i</i>	Q_{ci}	Caudal de concentrado [m^3/h]
Q_{pi}	Caudal de permeado [m^3/h]	$\bar{\pi}_i$	Presión osmótica promedio del lado del concentrado [<i>bar</i>]
A_i	Permeabilidad de la membrana [$m^3/(m^2 * h * bar)$]	π_{fi}	Presión osmótica de alimentación [<i>bar</i>]
S_E	Superficie de la membrana [m^2]	C_{fi}	Concentración de la alimentación [<i>ppm</i>]
TCF	Factor de corrección de temperatura para la permeabilidad de la membrana	C_{fci}	Concentración promedio del lado del concentrado [<i>ppm</i>]
T_w	Temperatura del agua de alimentación [$^{\circ}C$]	C_{ci}	Concentración del concentrado [<i>ppm</i>]
FF	Factor de ensuciamiento de la membrana	C_{pi}	Concentración del permeado [<i>ppm</i>]
P_{fi}	Presión de alimentación [<i>bar</i>]	CPF_i	Factor de polarización de la concentración
P_{ci}	Presión de concentrado [<i>bar</i>]	Y_i	Tasa de recuperación [%]
P_{pi}	Presión de permeado [<i>bar</i>]	π_{pi}	Presión osmótica del permeado [<i>bar</i>]
ΔP_{fci}	Caída de presión del lado del concentrado [<i>bar</i>]	R_i	Fración de rechazo de sal [%]
Q_{fi}	Caudal de alimentación [m^3/h]	B_i	Permeabilidad a sal de membrana [$m^3/(m^2 * h)$]

Las propiedades del agua de salobre como entalpía y volumen específico fueron obtenidas mediante librerías de Matlab desarrolladas por Lienhard (2017), las cuales estuvieron basadas en las ecuaciones descritas por Nayar et al. (2016) y Sharqawy et al. (2010). Mientras que, las asunciones recomendadas por Dow (2018), se detallan en la Tabla A.4.

Tabla A.4 Asunciones en el sistema de membranas

Presión de permeado P_p [MPa]	Presión de concentrado P_c [MPa]	Concentración de concentrado C_c [ppm]	Factor de ensuciamiento FF [%]
0.1	Presión de concentrado de la última membrana	Concentración de concentrado de la última membrana	85

Para caracterizar el arreglo de membranas se requirió definir 6 parámetros esenciales que describen las propiedades del agua de alimentación (Tabla 2.8) y el tipo de membrana (Tabla 3.1), los cuales se resumen en la (Tabla A.5).

Tabla A.5 Parámetros característicos

Parámetro	Valor
Presión del agua de alimentación P_f [MPa]	-
Área activa membrana S_e [m ²]	7.43
Factor de ensuciamiento FF	0.85
Temperatura del agua de alimentación T_w [°C]	25
Concentración del agua de alimentación C_f [ppm]	10000
Rechazo de sal de la membrana R_s	0.995

Así, el valor a iterar es la presión de alimentación para determinar el caudal de permeado según la configuración dispuesta y el resultado final debe considerar los límites operativo de las membranas que se especifican en la Tabla 3.1.

Primera configuración

Se dispuso de 6 membranas en serie dentro de un tubo a presión. En la Tabla A.6, se observa que a presión máxima las membranas trabajan por encima del límite y mientras esta se reduce también lo hace el caudal de permeado requerido.

Tabla A.6 Sistema de membranas a 3.6 m³/h

Parámetro	Símbolo	Unidad	Iteración 1	Iteración 2
Presión de alimentación mínima	$P_{f,min}$	MPa	82.7	5.5
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	2.541	1.97
Concentración de permeado	C_p	ppm	77.76	67.65
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	3.822	3.274
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	70.58	54.79
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	12.89	9.87
Tasa de recuperación elemento 6	Y_6	%	25.12	15.25

La única forma teórica de lograrlo es incrementando el caudal de alimentación, a 6 m³/h. Pero físicamente es inadecuado, ya que el máximo admisible es de 3.6 m³/h.

Segunda configuración (Preliminar)

Se dispuso de 2 tubos de presión con 6 membranas cada uno. En la Tabla A.7, se considera a una presión de alimentación constante de 5 MPa y en consecuencia las últimas membranas operan cerca del límite.

Tabla A.7 Sistema de membranas 2x6 a 5 MPa

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Caudal de alimentación mínimo	$Q_{f,min}$	m ³ /h	6.3
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.472
Concentración de permeado	C_p	ppm	67.82
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	2.959
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	55.11
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	10.04
Tasa de recuperación elemento 6	Y_6	%	15.2

Por otra parte, la configuración del sistema a una alimentación constante de 6 m³/h se muestra en la Tabla A.8, del cual se obtiene un menor desperdicio y consumo de energía específico, sin necesidad de que las membranas operen al límite. Con ello, es posible asegurar un flujo constante de agua dulce.

Tabla A.8 Sistema de membranas 2x6 a 6 m³/h

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Presión de alimentación mínima	$P_{f,min}$	MPa	4.4
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.043
Concentración de permeado	C_p	ppm	65.65
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	2.83
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	50.72
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	9.24
Tasa de recuperación elemento 6	Y_6	%	13.13

Se puede incrementar la presión hasta 4.8 MPa, con una máxima recuperación del elemento 6 de 15 %. Sin embargo, existiría un desperdicio del permeado de 3.294 m³/h y mayor consumo de 2.851 kWh/m³, por ello el sistema debe operar cerca de las condiciones de la Tabla A.8.

Tercera configuración

Al tratar de reducir las membranas contenidas en los 2 tubos de presión a 5 cada uno, se encontró que el consumo de energía específico se incrementa y las últimas membranas trabajan al límite.

Tabla A.9 Sistema de membranas 2x5 a 6 m³/h

Parámetro	Símbolo	Unidad	Magnitud
Presión de alimentación mínima	$P_{f,min}$	MPa	5
Caudal de permeado	Q_p	m ³ /h	3.012
Concentración de permeado	C_p	ppm	64.65
Consumo de energía específico	SPC	kWh/m ³	3.248
Tasa de recuperación del sistema	Y	%	50.2
Tasa de recuperación elemento 1	Y_1	%	10.8
Tasa de recuperación elemento 5	Y_6	%	15.43

Por tanto, el sistema de membranas 2x6 a 6 m³/h es el adecuado.

Consumo energético de la planta OI

De acuerdo con la recomendación de Dow (2018), la tubería de material 904L es conveniente para agua salobre con concentración SDT mayor a 7000 ppm y para seleccionar los diámetros de tubería la velocidad del flujo debe ser superior a 1.5 m/s para promover la formación y el mantenimiento de la película pasiva. En la Tabla A.10, se muestra un resumen de los tramos de tubería empleados en el sistema hidráulico.

Tabla A.10 Líneas de tuberías

Tramo	Descripción	Longitud
A	1 1/2" CED 40	40
B	1 1/2" CED 40	5
C	1" CED 40 ; 3/4" CED 40	1 ; 1.3
D	1" CED 40 ; 1/2" CED 40	1 ; 3.3
E	1" CED 40 ; 3/4" CED 40	1 ; 3.3

El espesor seleccionado para cada tubería se verificó en base a la siguiente ecuación que especifica el espesor mínimo requerido en mm:

$$t_{min} = \frac{P * D}{2 * S_y} + A \quad (A.17)$$

Donde P [MPa] es la presión de trabajo, D [mm] es el diámetro de la tubería, S_y [MPa] es la resistencia a la fluencia del acero inoxidable 904L de 220 MPa, y A [mm] es considerando un factor de seguridad de 0.0625". La verificación del espesor de las tuberías se realiza mediante código en Matlab para cada tipo en el Apéndice E.

En la Tabla A.11, se desglosa los accesorios requeridos para las líneas de tuberías.

Tabla A.11 Accesorios del sistema hidráulico

Tramo	Accesorio	Descripción	Cantidad	Uso
A	Codo 90	1 1/2"	2	Paso de flujo para tanque pretratamiento
B	Codo 90	1 1/2"	2	Conexión entre el tanque y línea de succión
	Válvula de mariposa	2"	1	Interrupción de flujo para mantenimiento
C	Tee	1"	1	Bifurcación del agua salobre para los 2 tubos de presión
	Codo 90	1"-3/4"	2	Paso de flujo para tubos de presión
	Codo 90	3/4"	2	
	Válvula de bola	1"	1	Control de flujo
D	Tee	1"	1	Confluencia del agua desalinizada desde los 2 tubos de presión
	Codo 90	1"-1/2"	2	Paso de flujo desde tubos de presión
	Codo 90	1/2"	2	
	Codo 90	1"	1	Paso de flujo hacia línea de postratamiento
	Válvula de bola	1"	1	Control de flujo
E	Tee	1"	1	Confluencia del agua de rechazo desde los 2 tubos de presión
	Codo 90	1"-3/4"	2	Paso de flujo desde tubos de presión
	Codo 90	3/4"	2	
	Codo 90	1"	1	Paso de flujo hacia línea de gestión de rechazo
	Válvula de bola	1"	1	Control de flujo

Potencia consumida por la bomba:

$$W_b = \frac{QH}{\eta_b} \quad (\text{A.18})$$

Pérdidas mayores por tuberías:

$$h_L = \frac{f\rho Lv^2}{2D} \quad (\text{A.19})$$

Pérdidas menores por accesorios:

$$h_e = \frac{K\rho v^2}{2} \quad (\text{A.20})$$

En la Tabla A.12 se muestra los coeficientes de pérdidas k por accesorios (Munson et al., 2013; SFA Soft, 2017). Mientras que, ciertas pautas generales para el cálculo de las

pérdidas de presión en los accesorios de la bomba de alta presión se muestran en la Figura A.1 (Danfoss, 2019).

Tabla A.12 Coeficiente de pérdida por accesorios

Accesorio	Coefficiente de pérdida K
Entrada de la tubería 1 1/2"	0.5
Salida de la tubería 1 1/2"	1
Válvula de mariposa 1 1/2"	0.8
Válvula de retención 1 1/2"	1.1
Codo 90° roscado (1 1/2", 1", 1" a 3/4", 3/4")	0.69
Tee roscada de bifurcación (1")	2

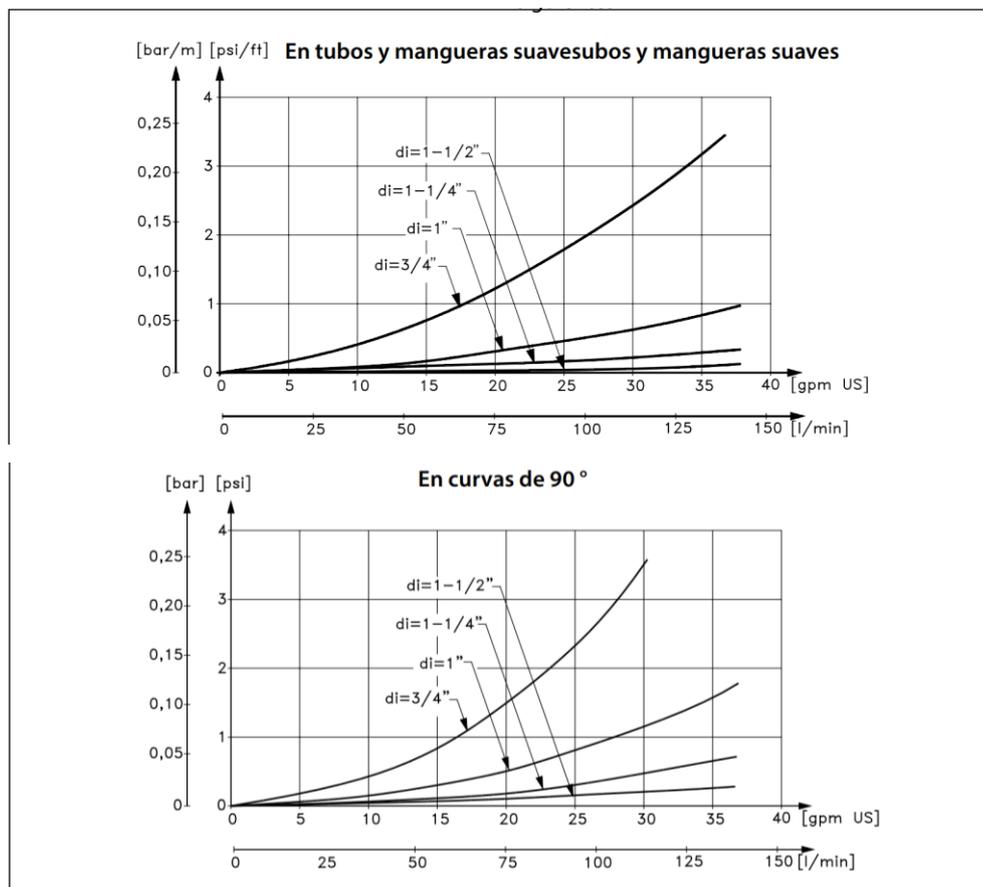


Figura A.1 Pautas para el cálculo de perdidas

El cálculo del cabezal y potencia teórica de las bombas fue determinado mediante el código de Matlab que se muestra en Apéndice F. Los resultados del sistema de bombeo requerido se muestran en la Tabla A.13 y se rectifican con los modelos comerciales de las Figura A.2 y Figura A.3.

Tabla A.13 Sistema de bombeo preliminar

Bomba	Aplicación	Caudal [m ³ /h]	Cabezal [m]	Potencia [kW]
Baja presión	Extracción del agua salobre	6	38.17	1.05
Alta presión	Alimentación al sistema OI	6	444.38	9.43

Por tanto, la potencia consumida por el sistema de bombeo es de 10.48 kW, pero teniendo en cuenta equipos auxiliares y las pérdidas inherentes se considera el valor de 11 kW para la planilla de consumo.

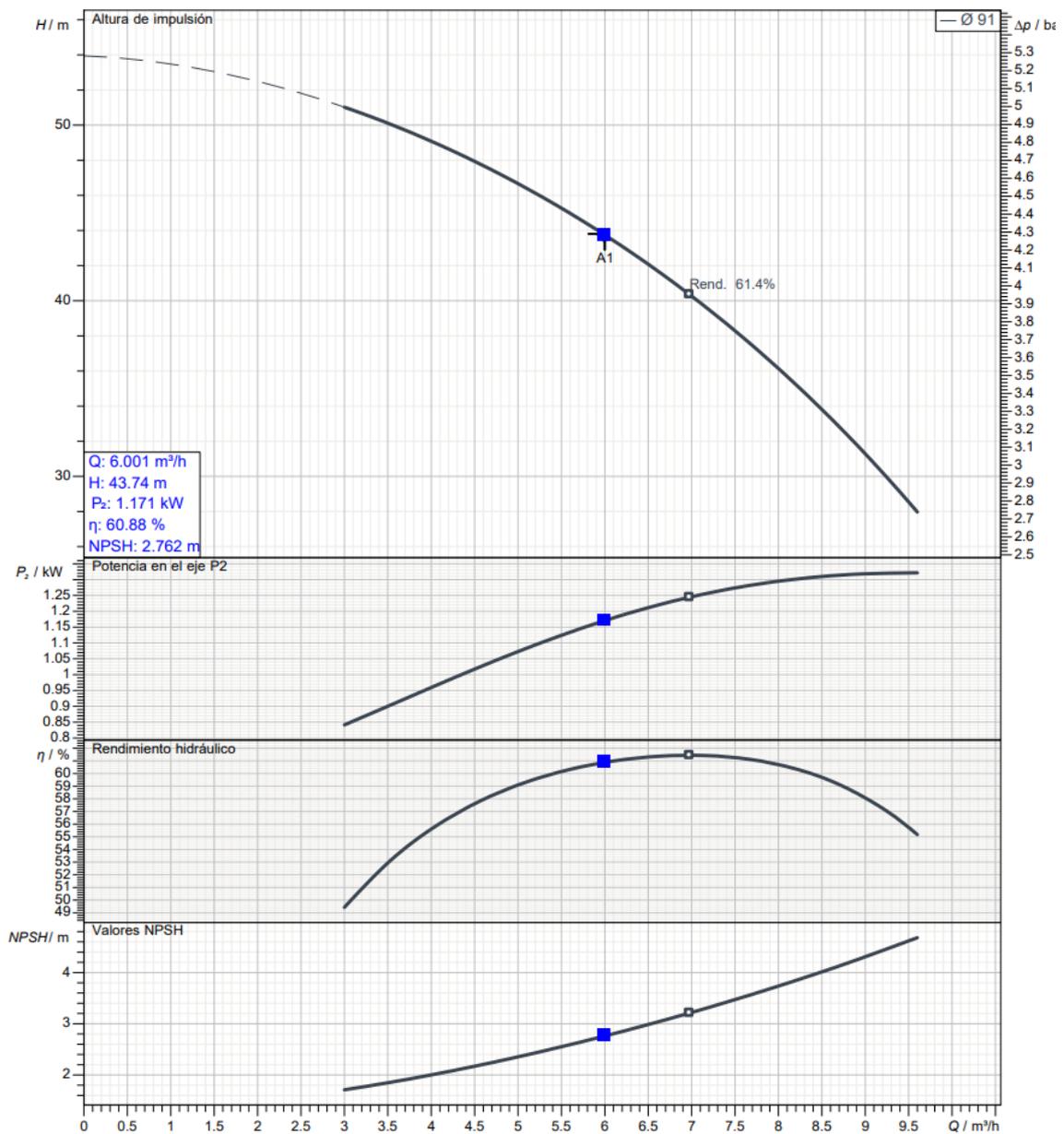


Figura A.2 Curva de operación bomba EVMSL5 4/1.5 (Ebara, 2022)

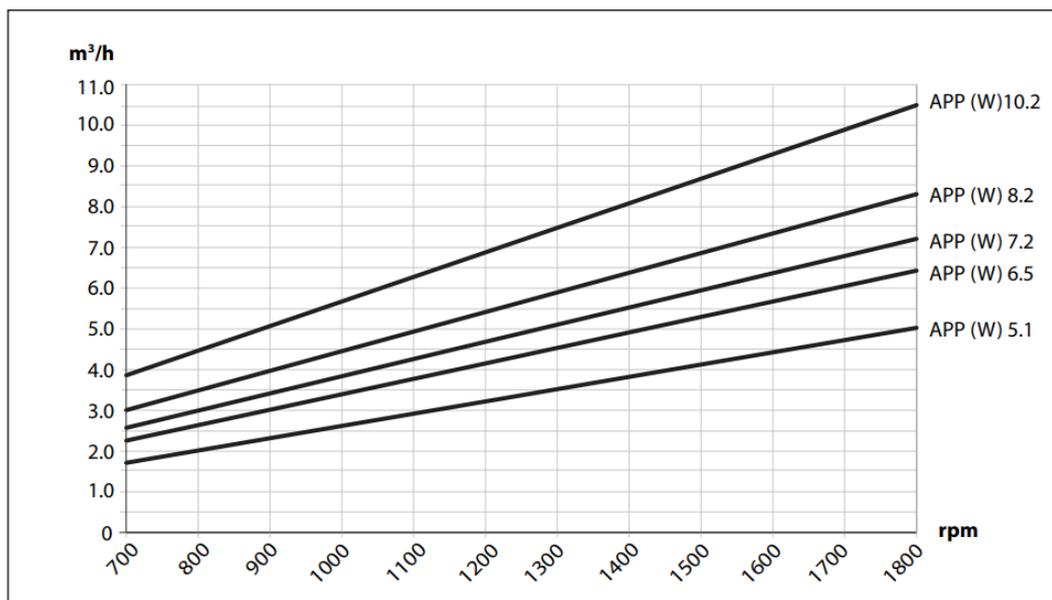


Figura A.3 Curva de operación bomba APP 6.5 (Danfoss, 2021)

Consumo real de la planta OI

Voutchkov (2018) presenta el desglose de la demanda energética de una planta de desalinización de agua de mar, que posee una concentración de 33500 ppm, proveniente del Océano Pacífico. Dentro del consumo de energía total, los porcentajes fraccionados corresponden a: sistema OI (71 %), pretratamiento (10.8 %), gestión de la salmuera (7.6 %), extracción (5.3 %) y postratamiento (5 %).

Con relación al presente estudio, se ha considerado solamente la demanda energética de la alimentación y el sistema OI, por ello la energía restante correspondería en un incremento del 31 % del valor calculado, resultando en un requerimiento de 14.4 kW para la planta. Así el consumo específico para la producción de agua potable se elevaría de 3.66 kWh/m³ a 4.8 kWh/m³.

Gestión del agua de rechazo

De acuerdo con Lenntech (2016) uno de los métodos mayormente utilizados para la gestión de la salmuera de plantas OI es la descarga de agua superficial, el cual es utilizado por más del 90 % de grandes desaladoras de agua de mar a nivel mundial. Esta puede ser directa cerca de la costa o en alta mar, donde ambas opciones suelen ser rentables para salmuera con medianos y grandes caudales.

Considerando que la planta OI es de baja capacidad ($\leq 1000 \text{ m}^3/\text{día}$), la concentración de la salmuera generada (20770 ppm) es inferior a los 30000 ppm que posee el agua marina, el antiincrustante contenido en la salmuera no es potencialmente peligroso y el agua de rechazo del proceso de electrólisis tampoco es potencialmente dañina, debido a que su purificación se lleva a cabo sin la utilización de productos químicos, por tanto, la opción de descarga cerca de la costa del mar podría ser viable y ambientalmente aceptable. Para ello se realizaría la dilución de la salmuera en el agua salobre previamente a la descarga, a fin de generar el mínimo impacto negativo sobre el ecosistema marino.

A pesar del análisis realizado en esta sección, el tratamiento de la salmuera no se encuentra dentro del alcance del trabajo, ya que se desconocen sus características fisicoquímica, y por ello se recomienda emprender un estudio detallado bajo el cumplimiento de los límites permisibles en calidad del agua, para la descarga al cuerpo de agua marina, que se especifican en el Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (MAE, 2015).

APÉNDICE B – DISEÑO DEL SFA EN HOMER PRO

Datos de entrada

1. Ubicación de la zona: Ingreso de las coordenadas.

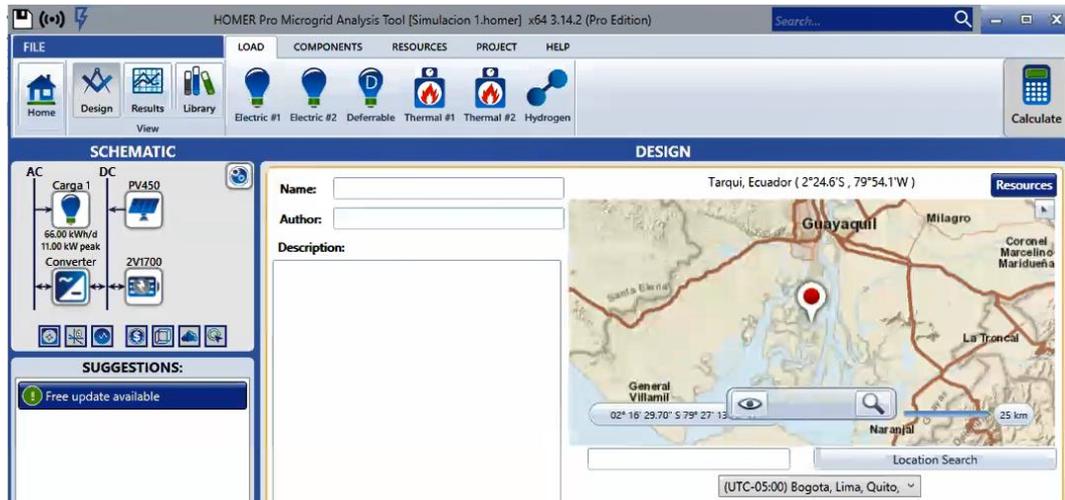


Figura B.1 Ubicación de la zona

2. Irradiación solar horizontal: Recurso solar disponible.

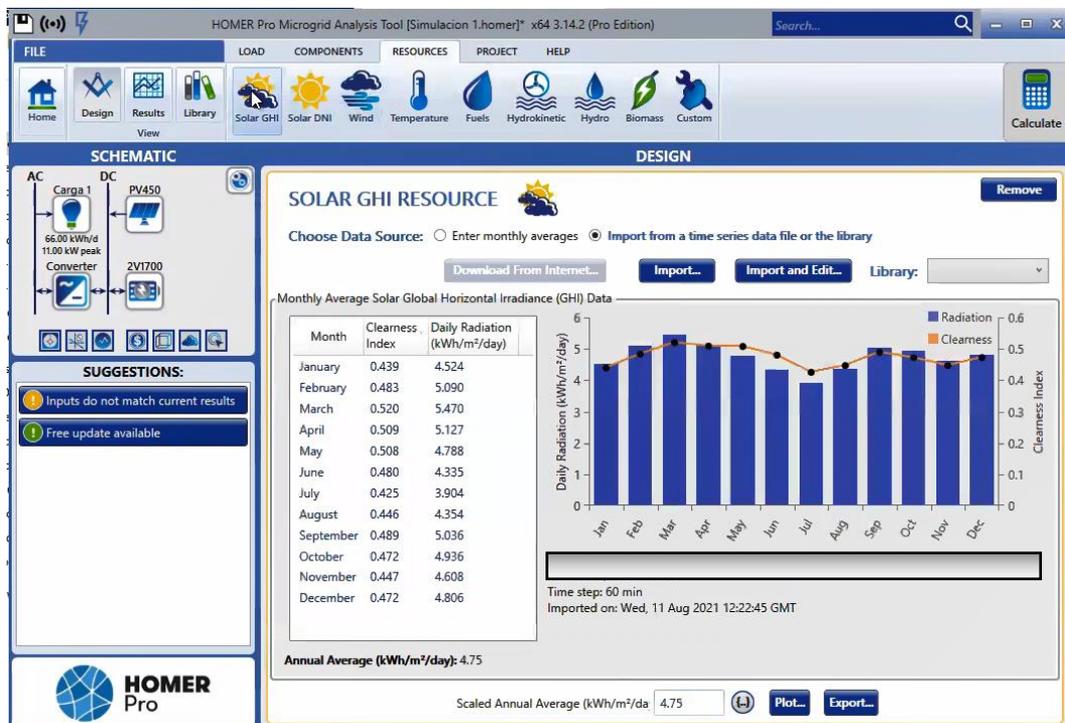


Figura B.2 Irradiación solar horizontal

3. Temperatura del ambiente: Temperatura existente en la zona.



Figura B.3 Temperatura del ambiente

4. Carga eléctrica: Perfil de consumo energético durante cada hora del año.

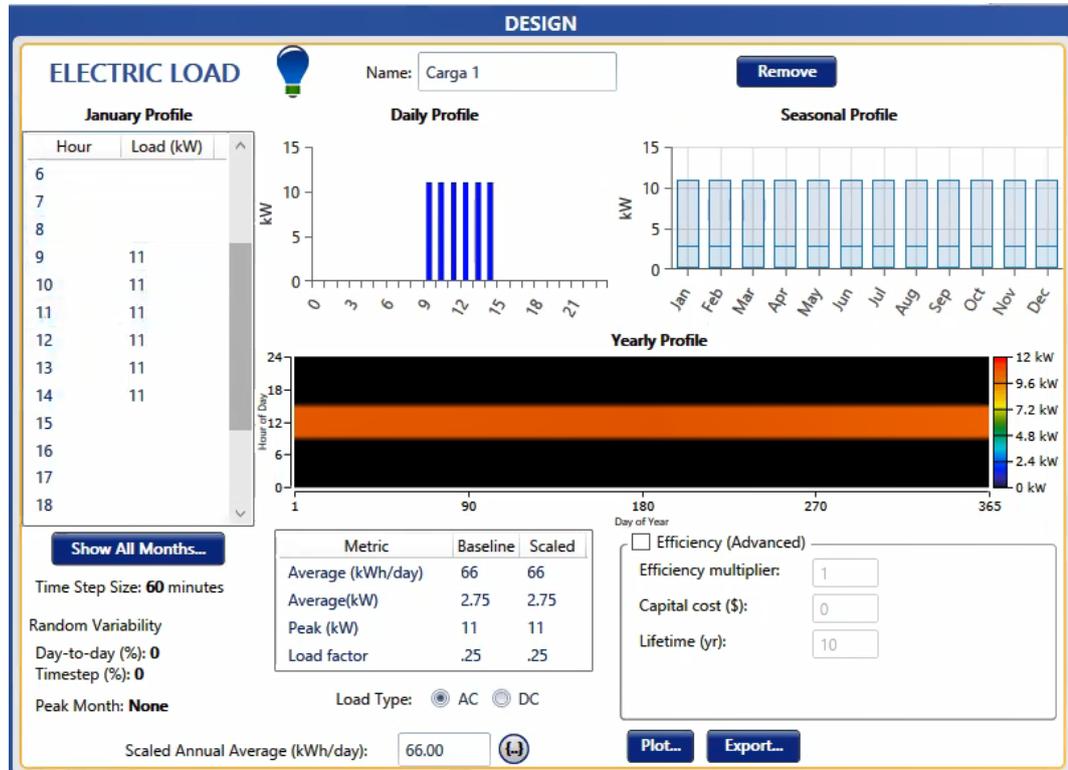


Figura B.4 Carga eléctrica

5. Paneles fotovoltaicos: Tipo de panel fotovoltaico seleccionado.

Add/Remove JA Solar 450W

PV  Name: JA Solar 450W Abbreviation: PV450 Remove
Copy To Library

Properties
 Name: **JA Solar 450W**
 Abbreviation: **PV450**
 Panel Type: **Flat plate**
 Rated Capacity (kW): **3**
 Temperature Coefficient: **-0.350**
 Operating Temperature (°C): **45.00**
 Efficiency (%): **20.30**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes:
This is a generic PV system.

Cost

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
0.45	295.00	0.00	0.00

Lifetime
 time (years): 25.00 More...

Site Specific Input
 Derating Factor (%): 90.00 More...

Sizing
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 Advanced

Electrical Bus
 AC DC

Advanced...

Figura B.5 Paneles fotovoltaicos

6. Baterías: Tipo de baterías empleadas.

Add/Remove OPzS Solar H1700

STORAGE  Name: OPzS Solar H1700 Abbreviation: 2V1700 Remove
Copy To Library

Properties
Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 2 
 Nominal Capacity (kWh): 4.02
 Maximum Capacity (Ah): 2.01E+03
 Capacity Ratio: 0.545
 Rate Constant (1/hr): 0.261
 Roundtrip efficiency (%): 85
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
discoverbattery.com
 Classic OPzV Solar

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	1,165.00	1,165.00	0.00

Lifetime
 throughput (kWh): 5,494.10 More...

Site Specific Input
 String Size: 48 Voltage: 96.00 V
 Initial State of Charge (%): 100.00 More...
 Minimum State of Charge (%): 20.00 More...

Sizing
 HOMER Optimizer™
 Search Space
 #
 1

Figura B.6 Baterías

7. Convertidor de potencia DC/AC: Inversor de corriente DC/AC.

CONVERTER System Converter Name: System Converter Remove
Complete Catalog Abbreviation: Convert Copy To Library

Properties
Name: System Converter
Abbreviation: Converter
www.homerenergy.com
Notes: This is a generic system converter.

Costs

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
10	\$9,000.00	\$9,000.00	\$0.0

Click here to add new item

Multiplier: (-) (-) (-)

Capacity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space
Size (kW)
15

Generic
homerenergy.com

HOMER Energy

Inverter Input
Lifetime (years): 10.00 (-)
Efficiency (%): 96.00 (-)

Rectifier Input
Relative Capacity (%): 0.00 (-)
Efficiency (%): 0.00 (-)

Parallel with AC generator?

Figura B.7 7. Convertidor de potencia DC/AC

8. Controlador microrred: Estrategia de despacho de carga a utilizar.

CONTROLLER SET UP

HOMER Load Following
HOMER Cycle Charging
HOMER Load Following

Notes: The load follows the load whereby the storage produces or load. Lower the storage are left to the generator may still ramp up and sell power to the grid if it is economically advantageous.

strategy
it
primary
charging
e load
The

Add

HOMER Load Following (LF)

Figura B.8 Controlador microrred

9. Economía: Estimación de los costos fijos.

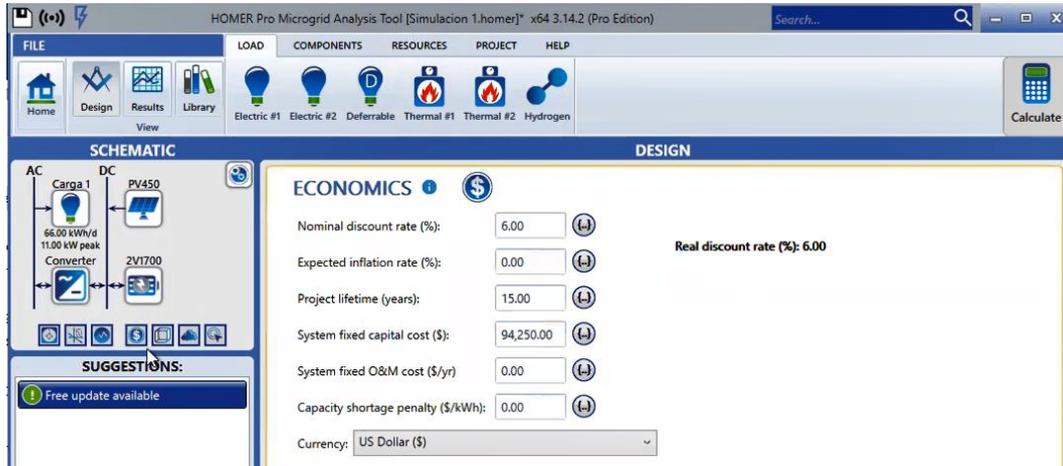


Figura B.9 Costos fijos

Resultados

1. Resumen de costos: Desglose de costos de cada sistema.

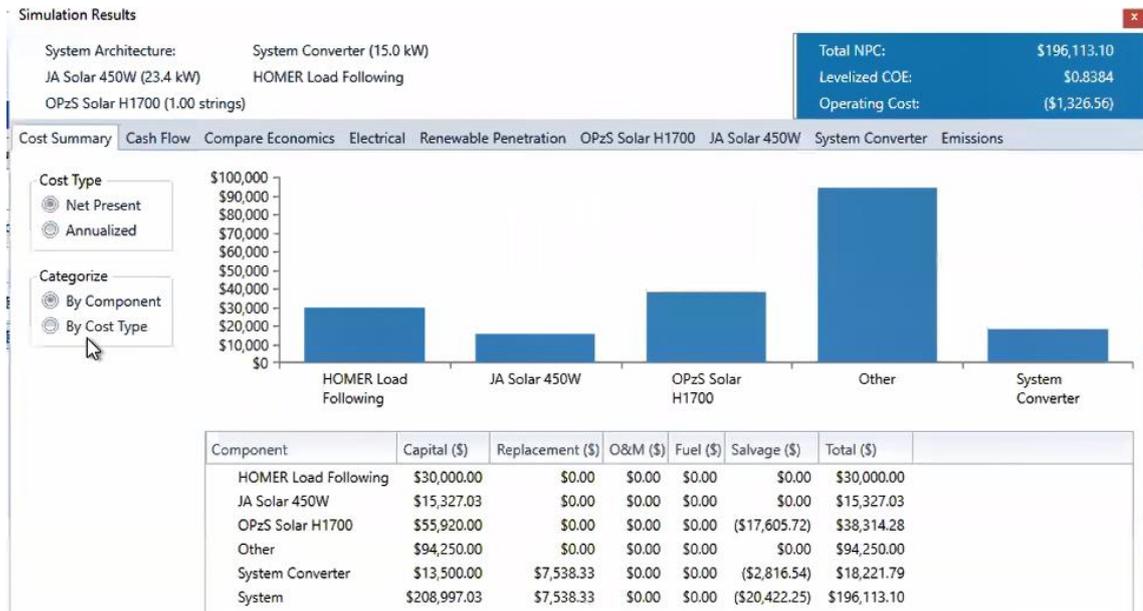


Figura B.10 Resumen de costos

2. Resumen parte eléctrica: Producción eléctrica del sistema de potencia.



Figura B.11 Resumen parte eléctrica

3. Baterías: Comportamiento del arreglo de baterías.



Figura B.12 Baterías

4. Paneles fotovoltaicos: Comportamiento del arreglo de paneles fotovoltaicos.

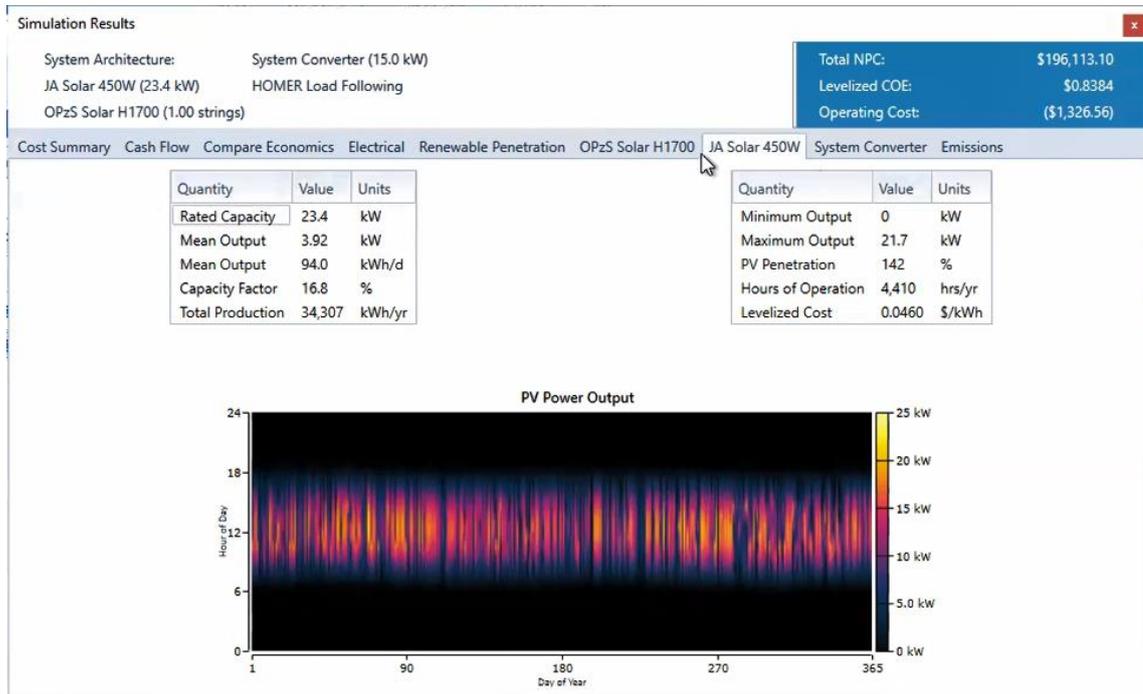


Figura B.13 Paneles fotovoltaicos

5. Inversor DC/AC: Comportamiento del inversor DC/AC.



Figura B.14 Inversor DC/AC

6. Matriz de resultados: Matriz de datos de los resultados obtenidos por cada hora del año (8760 datos), de las 31 variables analizadas.

View Output Time Series

Date	Time	Global Solar (kW/m2)	JA Solar 450W Solar Altitude (°)	JA Solar 450W Solar Azimuth (°)	JA Solar 450W Angle of Incidence (°)	JA Solar 450W Incident Solar (kW/m2)	JA Solar 450W Power Output (kW)	JA Solar 450W Cell Temperature (°C)	Ambient Temperature (°C)	AC Primary Load (kW)	AC Primary Load Served (kW)	Total Electrical Load Served (kW)	Renewable Penetration (%)	Excess Electrical Production (kW)	Unmet Electrical Load (kW)	Total Renewable Power Output (kW)	Inverter Power Input (kW)	Inverter Power Output (kW)	OPzS Solar H1700 Maximum Charge Power (kW)	OPzS H1 Max Disc Po (k
Jan 1	1:00 AM	0.00	0.00	-4.24	90.00	0.00	0.00	28.50	28.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	2:00 AM	0.00	0.00	-32.09	90.00	0.00	0.00	27.70	27.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	3:00 AM	0.00	0.00	-48.94	90.00	0.00	0.00	26.90	26.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	4:00 AM	0.00	0.00	-58.14	90.00	0.00	0.00	26.50	26.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	5:00 AM	0.00	0.00	-63.22	90.00	0.00	0.00	26.10	26.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	6:00 AM	0.00	0.00	-65.93	90.00	0.00	0.00	25.80	25.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	7:00 AM	0.01	2.77	-66.99	88.18	0.01	0.23	26.17	25.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	8:00 AM	0.24	16.56	-66.61	74.41	0.23	4.62	32.81	27.30	0.00	0.00	0.00	0.00	4.62	0.00	4.62	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	9:00 AM	0.50	30.22	-64.55	60.84	0.48	9.64	40.82	28.90	0.00	0.00	0.00	0.00	9.64	0.00	9.64	0.00	0.00	0.00	0.00
Jan 1	10:00 AM	0.74	43.51	-59.91	47.73	0.72	13.99	48.34	30.40	11.00	11.00	11.00	11.00	127.19	2.53	0.00	13.99	11.46	11.00	0.00
Jan 1	11:00 AM	0.93	55.88	-50.37	35.70	0.91	17.21	54.54	31.80	11.00	11.00	11.00	11.00	156.48	5.75	0.00	17.21	11.46	11.00	0.00
Jan 1	12:00 PM	0.55	65.77	-30.32	26.33	0.54	10.64	45.35	31.90	11.00	11.00	11.00	11.00	96.71	0.00	0.00	10.64	11.46	11.00	0.00
Jan 1	1:00 PM	0.54	69.22	5.16	23.18	0.54	10.53	45.21	31.90	11.00	11.00	11.00	11.00	95.77	0.00	0.00	10.53	11.46	11.00	0.61
Jan 1	2:00 PM	0.42	63.56	37.13	28.39	0.42	8.28	41.89	31.60	11.00	11.00	11.00	11.00	75.25	0.00	0.00	8.28	11.46	11.00	1.30
Jan 1	3:00 PM	0.37	52.75	53.61	38.72	0.37	7.37	40.40	31.30	11.00	11.00	11.00	11.00	66.99	0.00	0.00	7.37	11.46	11.00	3.66
Jan 1	4:00 PM	0.30	40.05	61.48	51.14	0.30	5.97	38.09	30.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.97	0.00	0.00	0.00	6.70
Jan 1	5:00 PM	0.16	26.62	65.29	64.41	0.16	3.25	34.20	30.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00	3.25	0.00	0.00	0.00	2.93
Jan 1	6:00 PM	0.05	12.91	66.86	78.05	0.05	1.11	30.91	29.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00	0.23
Jan 1	7:00 PM	0.00	0.00	66.85	90.00	0.00	0.00	28.90	28.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20
Jan 1	8:00 PM	0.00	0.00	65.39	90.00	0.00	0.00	28.20	28.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
Jan 1	9:00 PM	0.00	0.00	62.15	90.00	0.00	0.00	27.60	27.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.46
Jan 1	10:00 PM	0.00	0.00	56.21	90.00	0.00	0.00	26.90	26.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55
Jan 1	11:00 PM	0.00	0.00	45.42	90.00	0.00	0.00	26.30	26.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.62
Jan 2	12:00 AM	0.00	0.00	25.76	90.00	0.00	0.00	25.60	25.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68
Jan 2	1:00 AM	0.00	0.00	-4.01	90.00	0.00	0.00	25.20	25.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.72
Jan 2	2:00 AM	0.00	0.00	-32.01	90.00	0.00	0.00	24.70	24.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75
Jan 2	3:00 AM	0.00	0.00	-48.95	90.00	0.00	0.00	24.20	24.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77
Jan 2	4:00 AM	0.00	0.00	-58.14	90.00	0.00	0.00	23.80	23.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78

Figura B.15 Matriz de resultados

APÉNDICE C – MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA

El esquema del modelo de simulación del sistema integrado se visualiza en la Figura C.1

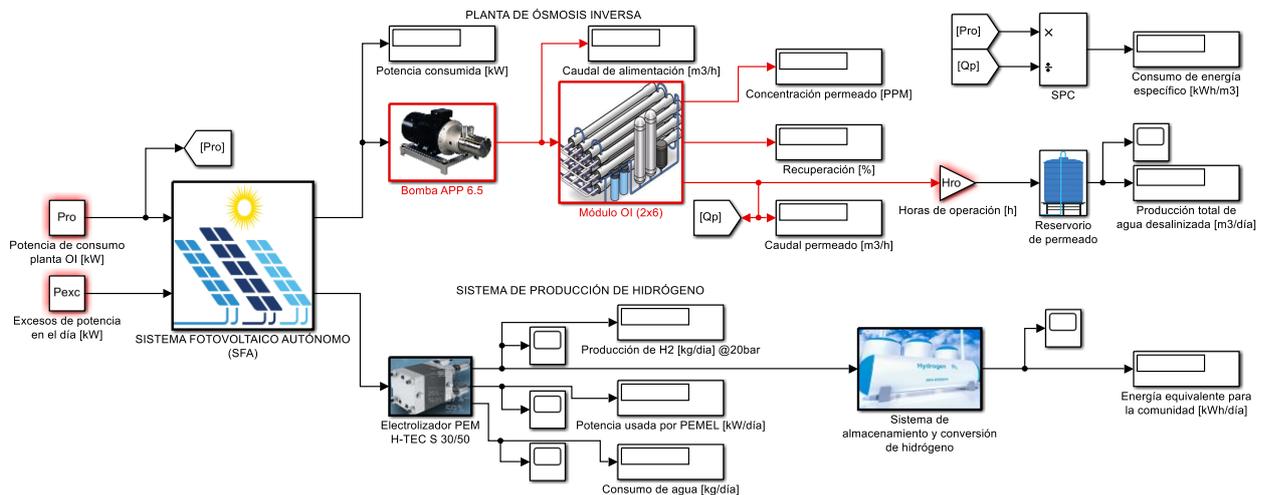


Figura C.1 Modelo Simulink del sistema integrado

A continuación, se describe sobre el modelado de cada uno de sus componentes:

Modelado del Sistema Fotovoltaico Autónomo (SFA)

La simulación de HOMER Pro entregó 8760 datos, que corresponden a cada hora del año típico, de 31 parámetros analizados. A partir de ello, se extrajeron los valores de potencia entregada por los paneles fotovoltaicos, la carga AC de la planta y los excesos de producción eléctrica. De tal forma que la salida del SFA corresponde a la alimentación eléctrica de la bomba APP 6.5 y del electrolizador PEM.

Modelado de la bomba de alta presión

El caudal de alimentación entregado por la bomba en m³/h es (Danfoss, 2021):

$$Q_f = \frac{\eta * FC * P}{16.7 * H} \quad (C.1)$$

En la Tabla C.1 se muestra los valores empleados para el cálculo, del cual se obtuvo un flujo de alimentación de 5.78 m³/h.

Tabla C.1 Parámetros de la bomba de alta presión

Eficiencia de la bomba	Factor de cálculo	Presión requerida
η	FC	H [bar]
0.87	514	44

Modelado de sistema OI

El modelo que se utilizó en el sistema de membranas se muestra en la Figura C.2, el cual requirió 6 valores de entrada definidos anteriormente que se describen en la Tabla C.2.

Tabla C.2 Función de inicio requerida en bloque de sistema OI

Parámetro	Valor
Área activa membrana S_e [m ²]	7.43
Factor de ensuciamiento FF	0.85
Temperatura del agua de alimentación T_w [°C]	25
Presión del agua de alimentación P_f [bar]	50
Concentración del agua de alimentación C_f [ppm]	10000
Rechazo de sal de la membrana R_s	0.995

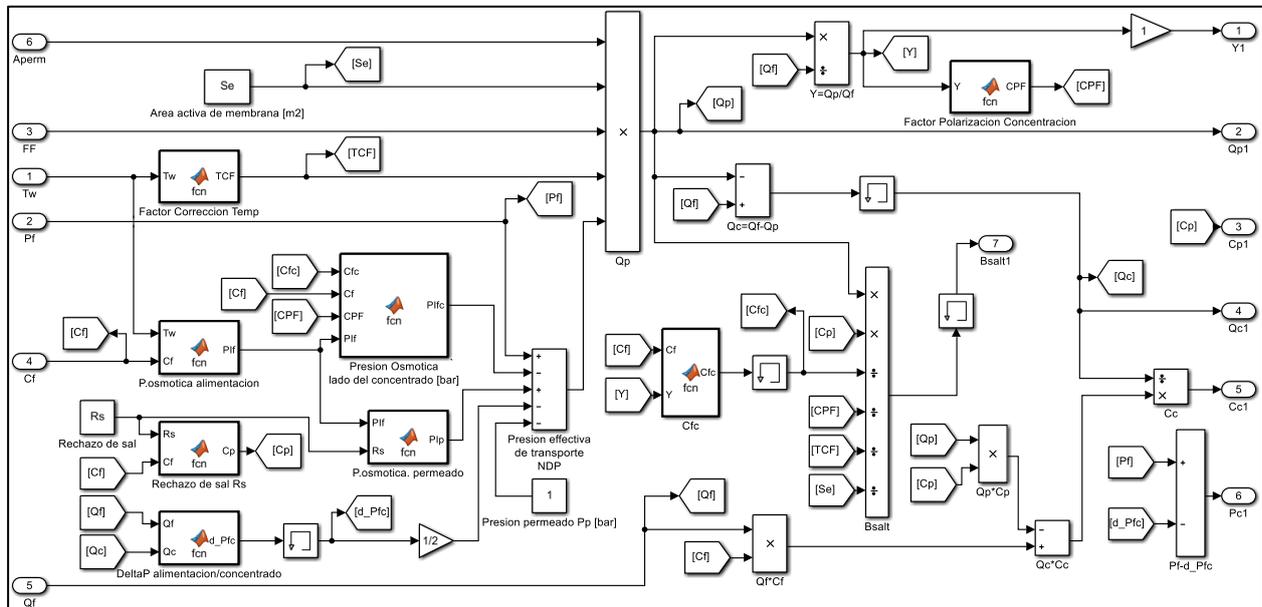


Figura C.2 Modelo Simulink de una membrana OI

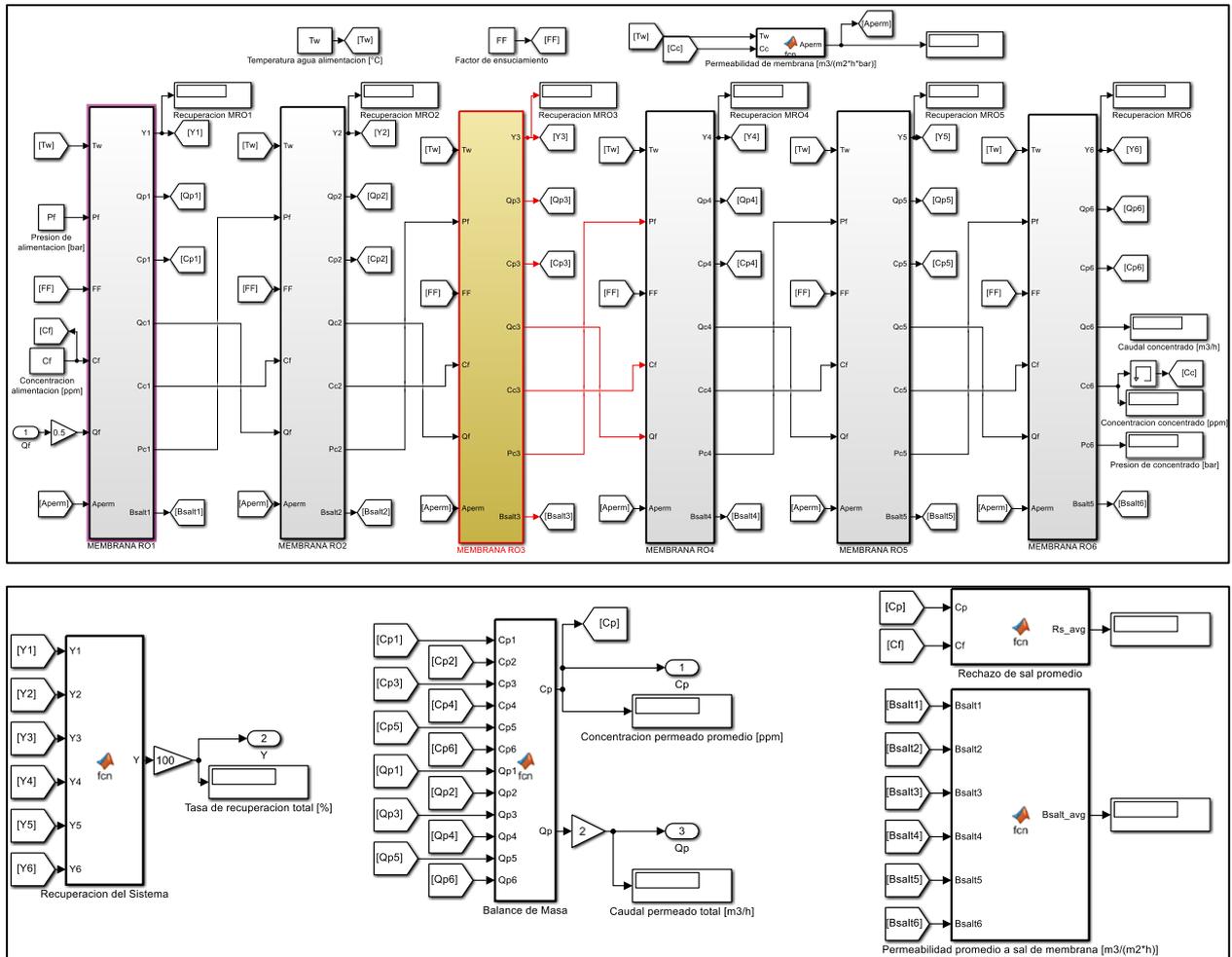


Figura C.3 Modelo Simulink del sistema de membranas OI

El sistema de membranas OI se muestra como un solo arreglo de 6 membranas en serie, pero representa a los dos tubos de presión considerando la operación con la misma alimentación, esto fue realizado con la intención de obtener un ahorro computacional.

La validación de los valores obtenidos de recuperación fue verificada membrana por membrana y se muestra en la Tabla C.3.

Tabla C.3 Tasa de recuperación por membrana

Porcentaje de recuperación por membrana [%]					
1	2	3	4	5	6
9.52	10.23	11.03	11.88	12.77	13.64

Sistema de producción de hidrógeno

El electrolizador PEM tiene como entrada la lectura de los excesos de energía del SFA, en la Figura C.4 se observa el ajuste entre la producción de hidrógeno, la eficiencia energética y la potencia consumida, mientras que, la Figura C.5 representa la demanda de agua para electrólisis, estas curvas son las que permiten modelar el comportamiento del electrolizador.

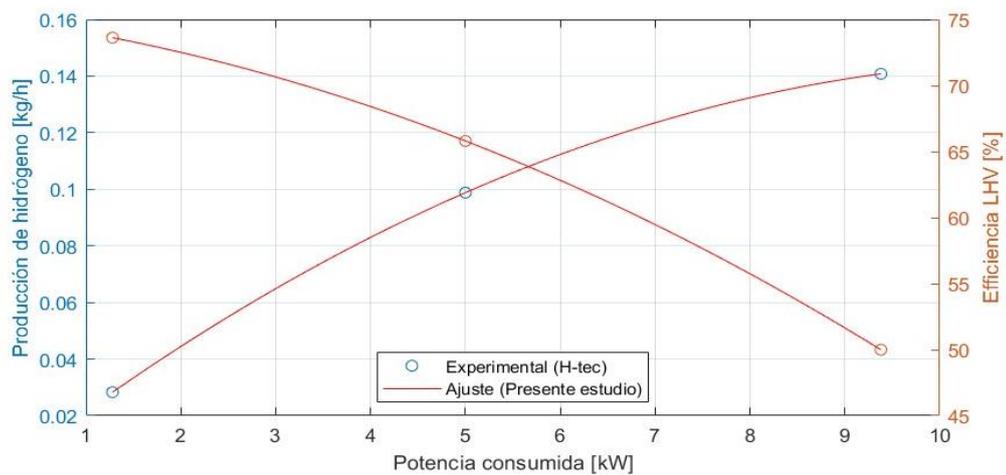


Figura C.4 Producción de hidrógeno y Eficiencia vs Potencia consumida

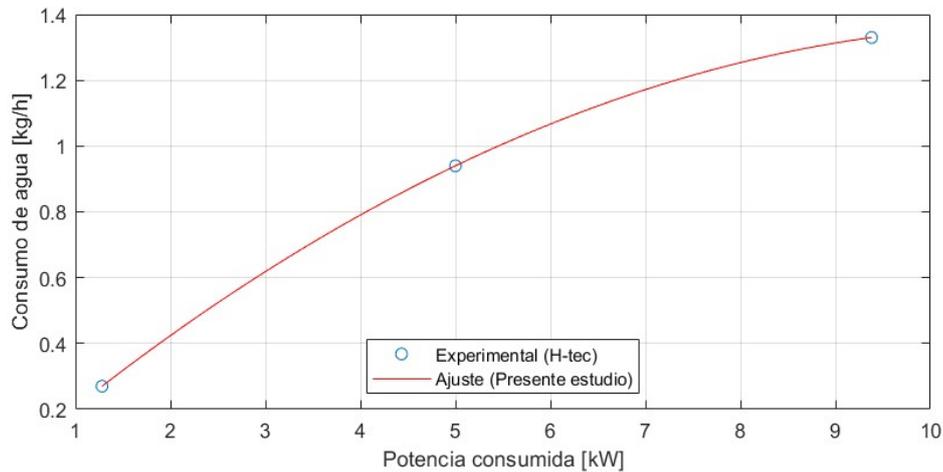


Figura C.5 Consumo de agua vs Potencia consumida

Adicionalmente, se muestra la curva característica del electrolizador que describe su comportamiento logarítmico debido al voltaje reversible y los sobrevoltajes de activación, óhmico y de difusión, necesarios para llevar a cabo el proceso de electrólisis del agua.

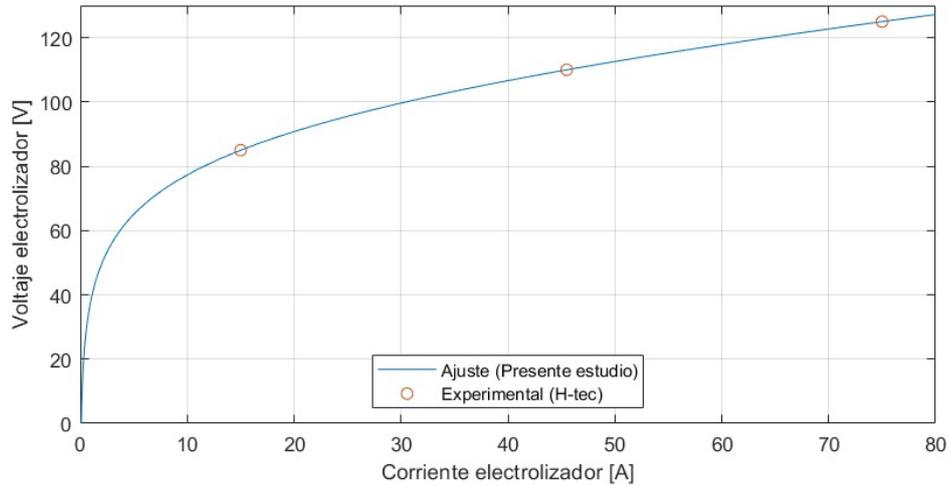


Figura C.6 Curva característica del stack de celdas electroquímicas

Sistema de almacenamiento y conversión de hidrógeno

Para proyectar la energía eléctrica equivalente obtenida con el hidrógeno almacenado, se empleó la ecuación que describe la potencia suministrada por la celda de combustible (Siemens Energy, 2021).

$$P_{fc} = \eta_{fc} * \dot{m}_{H_2} * LHV \quad (C.2)$$

Donde \dot{m}_{H_2} [kg/h] es el flujo másico de hidrógeno consumido, LHV [kWh/kg] es el poder calorífico inferior del hidrógeno de 33.3 kWh/kg y η_{fc} es la eficiencia de la celda de combustible del 50 % (véase sección 2.7).

Finalmente, el código de Matlab utilizado se presenta en el Apéndice F.

De acuerdo con Kianfard et al. (2018), la planta OI posee un caudal de alimentación de 485.9 m³/h y el sistema de potencia dispone en exceso 1100 kWh para alimentar el electrolizador PEM. Los 9 parámetros que definen al módulo OI, se muestran en la Tabla D.1

Tabla D.1 Parámetros del sistema empleado para validación

Parámetro	Valor
Área activa membrana S_e [m ²]	35.4
Permeabilidad a sal de membrana B_{salt} [10^5 m ³ /(m ² *h)]	5.348
Factor de ensuciamiento FF	0.85
Temperatura del agua de alimentación T_w [°C]	25
Concentración del agua de alimentación C_f [ppm]	45000
Rechazo de sal de la membrana R_s	0.9944
Recuperación del sistema	0.3
Número de elementos por tubo	7
Número de tubos de presión	42

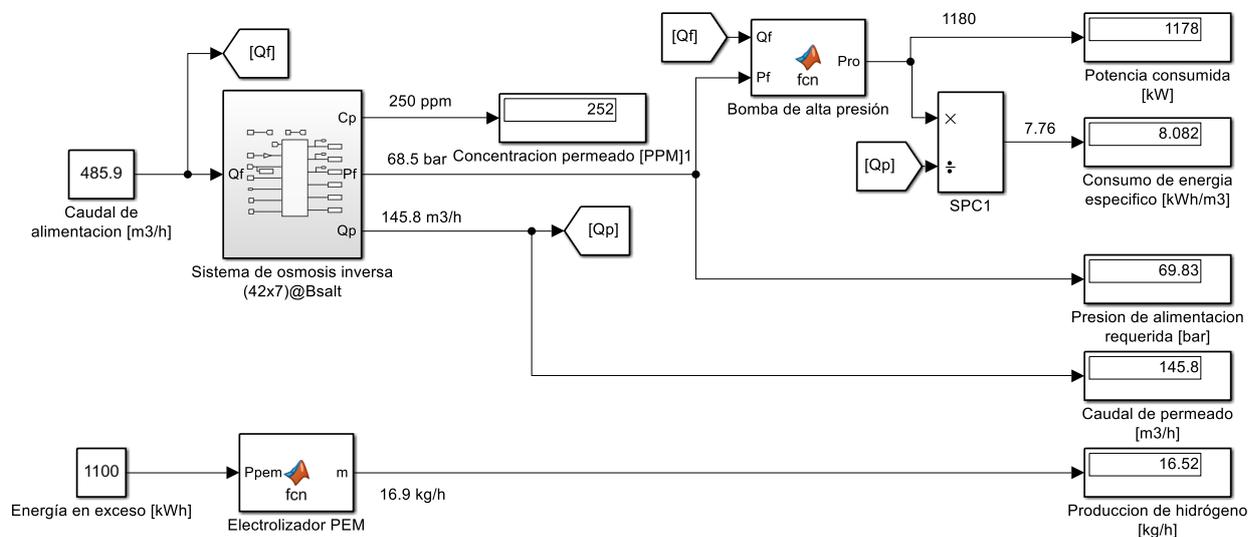


Figura D.2 Modelo Simulink del sistema integrado para validación

La comparación de los resultados obtenidos se muestra en la Tabla D.2, donde el error absoluto no excede el 5 %. Por tanto, el modelo utilizado es válido.

Tabla D.2 Comparación de resultados entre sistema de referencia y propuesto

Parámetro	Kianfard et al.	Presente modelo	Error [%]
Presión de alimentación P_f [MPa]	6.85	6.98	1.94
Caudal de permeado Q_p [m ³ /h]	145.8	145.8	0.00
Potencia consumida OI [kW]	1180	1178	0.17
Consumo de energía específico SPC [kWh/m ³]	7.76	8.082	4.15
Concentración de permeado C_p [ppm]	250	252	0.80
Producción de hidrógeno	16.9	16.52	2.25

APÉNDICE E – CÁLCULO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El cálculo de la eficiencia energética del sistema integrado requiere de una simplificación en el modelo propuesto, su esquema se visualiza en la Figura E.1.

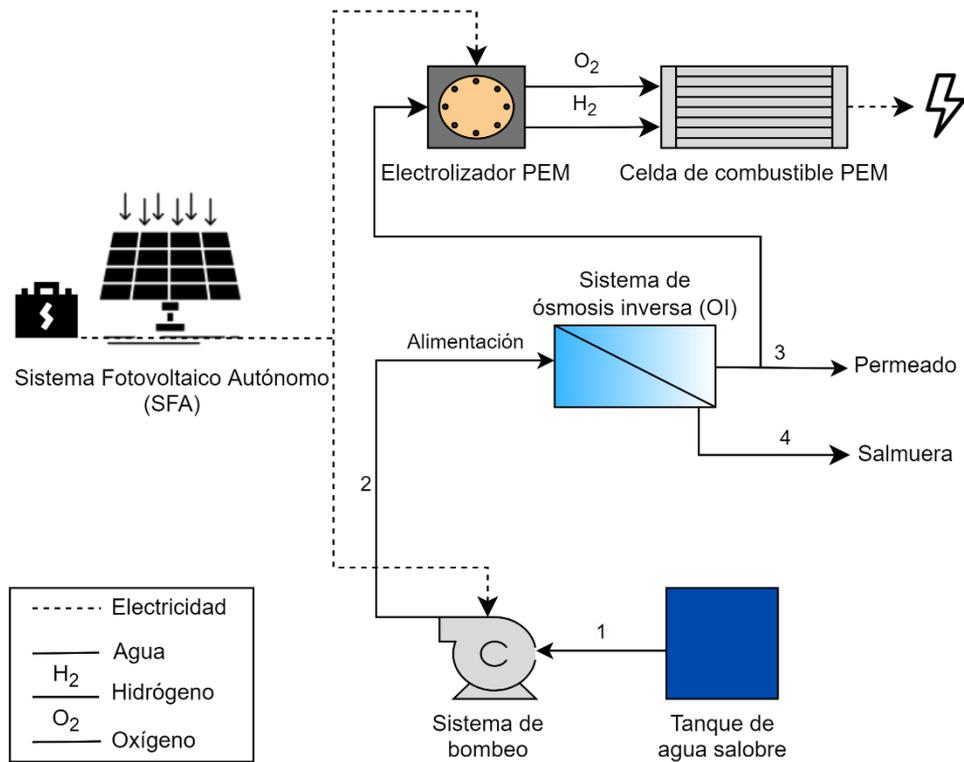


Figura E.1 Diagrama esquemático del sistema integrado simplificado

Las ecuaciones termodinámicas de balance de energía y materia de los componentes del sistema se describen a continuación:

Tabla E.1 Ecuaciones de balance de energía y materia

Componente	Balance de energía	Balance de materia
Bombas	$\int \dot{m}_1 \cdot h_1 \cdot dt + \int \dot{W}_p \cdot dt = \int \dot{m}_2 \cdot h_2 \cdot dt$	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$
Módulo OI	$\int \dot{m}_2 \cdot h_2 \cdot dt = \int \dot{m}_3 \cdot h_3 \cdot dt + \int \dot{m}_4 \cdot h_4 \cdot dt$	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_4$

En la Tabla E.2 y Tabla E.3, se detallan las asunciones y consideraciones en los estados termodinámicos.

Tabla E.2 Consideraciones en los estados termodinámicos

Descripción	Consideración
Propiedades constantes en el tiempo	$\int dt = \Delta t$
La temperatura del agua salobre varía con la Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD) entre la temperatura superficial del agua y la temperatura del ambiente	$T_{ml} = \frac{T_{amb} - T_f}{\ln\left(\left \frac{T_{amb}}{T_f}\right \right)}$

Tabla E.3 Estados termodinámicos

Estado	1	2	3	4
Entalpía	$h_1(T_{ml}, C_f, P_{atm})$	$h_2 = \frac{\dot{m}_1 * h_1 + \dot{W}_p}{\dot{m}_2}$	$h_3(T_2, C_p, P_{atm})$	$h_4 = \frac{\dot{m}_2 * h_2 - \dot{m}_3 * h_3}{\dot{m}_4}$

Finalmente, las eficiencias energéticas de los componentes y del sistema integrado están dadas por:

Tabla E.4 Eficiencia energética de los componentes

Componente	Eficiencia energética
Planta OI	$\eta_{OI} = \frac{\int \dot{m}_3 \cdot h_3 \cdot dt}{\int \dot{W}_p \cdot dt + \int \dot{m}_1 \cdot h_1 \cdot dt}$
Electrolizador PEM	$\eta_{elec} = \frac{\dot{m}_{H2} * LHV}{P_{elec}}$
Celda de combustible PEM	$\eta_{fc} = 0.5$

Tabla E.5 Eficiencia energética del sistema integrado

Operación	Eficiencia energética del sistema	
Solo Planta OI	$\eta_{sis,I} = \frac{\dot{m}_3 * h_3}{\dot{m}_1 * h_1 + P_{SFA}}$	(D.1)
Planta OI y Electrolizador PEM	$\eta_{sis,II} = \frac{\dot{m}_3 * h_3 + \dot{m}_{H2} * LHV}{\dot{m}_1 * h_1 + P_{SFA}}$	(D.2)
Planta OI, Electrolizador y Celda de combustible PEM	$\eta_{sis,II} = \frac{\dot{m}_3 * h_3 + P_{fc}}{\dot{m}_1 * h_1 + P_{SFA}}$	(D.3)

APÉNDICE F – CÓDIGO DE MATLAB

Verificación del espesor de tuberías

```
%% Comprobación de espesores de Tuberías SS 904L
%D=1.1/2", CED 40
D1=1.5*25.4;
Sy=220e6; %Resistencia a la fluencia [MPa]
t1=0.145*25.4 %Espesor de tubería [mm]
P=4.4e6; %Presión de trabajo [MPa]
A=0.0625*25.4; %Factor de seguridad desgaste por corrosión [mm]
tmin1=P*(D1)/(2*Sy)+A %Espesor mínimo requerido [mm]
if tmin1<t1
    disp('Espesor de tubería 1.1/2" soporta condiciones')
end

%D=1", CED 40
t2=0.133*25.4 %Espesor de tubería [mm]
D2=1*25.4; %Diámetro de tubería [mm]
tmin2=P*(D2)/(2*Sy)+A %Espesor mínimo requerido [mm]
if tmin2<t2
    disp('Espesor de tubería 1" soporta condiciones')
end

%D=3/4", CED 40
t3=0.113*25.4 %Espesor de tubería [mm]
D3=(3/4)*25.4; %Diámetro de tubería [mm]
tmin3=P*(D3)/(2*Sy)+A %Espesor mínimo requerido [mm]
if tmin3<t3
    disp('Espesor de tubería 3/4" soporta condiciones')
end
```

Cabezal y potencia teórica

%% Bomba de alta presión

Q=6; %Caudal de alimentación [m3/h]
z1=5; %Punto 1 [m] (altura del tanque de almacenamiento)
z2=1; %Punto 2 [m] (altura a la entrada al sistema RO)
L1=2+1.16; %Longitud mangueras a 180° [m]
L2=0.66; %Longitud manguera a 90° [m]
L3=2+2+1+0.5+z2+2*(0.55+0.1); %Longitud tubería acero inoxidable [m]
f=0.02; %Factor de fricción
D=0.038; %Diámetro tubería inox 1.1/2" [m]
P2=4.4e6; %Presión requerida sobre membranas [Pa]
v=4*Q/(pi*D^2*3600) %Velocidad fluido [m/s](Min 1.5 m/s)

%Agua salobre

rho=1006.4; %Densidad del agua salobre
SW_Density(25,'C',10000,'PPM',44,'bar') [kg/m3]
g=9.81; %Aceleración de la gravedad [m/s2]

hf1=(L1*0.05/6+0.05*L2/8)*10^5/(rho*g); %Pérdidas mayores en mangueras [m]
hf2=8*f*L3*(Q/(3600*pi))^2/(g*D^5); %Pérdidas mayores en tubería inox [m]
k=0.5+1+1*0.8+2*1.1+9*0.69+3*2; %Coeficiente de perdidas por accesorios
hm=k*8*(Q/(3600*pi*D^2))^2/g; %Pérdidas menores por accesorios

hf=hf1+hf2; %Total pérdidas mayores
hbp=P2/(rho*g); %Cabezal sin pérdidas [m]
hb=P2/(rho*g)+v^2/(2*g)+(z2-z1)+hf+hm %Cabezal bomba 444.38 [m]
Preq_bar=hb/10.1974 %Presión de trabajo de bomba 43.58 [bar]
Preq_MPa=hb/101.974 %Presión de trabajo de bomba 4.36 [MPa]
W = (Q*Preq_bar/31.5)/0.88 %Potencia teórica de consumo 9.5 [kW]

%% Bomba de almacenamiento de agua de alimentación

Qf=6;
D=1.5*0.0254;
v=4*Qf/(pi*D^2*3600) %Velocidad del fluido [m/s] (Min 1.5 m/s)
L1=30; %Succión (profundidad pozo)[m]
L2=1; %Succión recta [m]
L3=2; %Descarga recta [m]
L4=5; %Descarga elevación (altura tanque) [m]
L=L1+L2+L3+L4; %Longitud total [m]
z1=-L1; %Punto 1 [m]
z2=L4; %Punto 2 [m]

rho=1004.7; %Densidad del agua salobre
SW_Density(25,'C',10000,'PPM',4,'bar')

hf=8*f*L*(Qf/(3600*pi))^2/(g*D^5); %Pérdidas mayores en tubería inox [m]
hm=1; %Pérdidas menores por accesorios [m]

hb=(z2-z1)+hf+hm %Cabezal de la bomba 38.17 [m]

$$P_f = h_b / 10.1974$$

%Presión de trabajo de bomba 3.74 [bar]

$$Q = Q_f * 4.40288;$$

%Caudal [m³/h] a [gpm]

$$P = P_f * 14.5038;$$

%Caudal [bar] a [psi]

$$W = 0.7457 * (Q * P / 1460) / 0.7$$

%Potencia teórica de consumo 1.05 [kW]

Sistema integrado

```
close all
```

```
clear
```

```
clc
```

```
dTemp=readmatrix('DatosTemperatura.xlsx');
```

```
datos=readmatrix('DatosHomerCM.xlsx');
```

```
ndatos=size(datos,1);
```

```
dias = ndatos/24;
```

```
cdias=1;
```

```
mData=zeros(dias,35);
```

```
mMes=zeros(12,15);
```

```
IMes=dTemp(:,2);
```

```
ITemp=dTemp(:,3);
```

```
Hro=0;
```

```
irr=0;
```

```
temp=0;
```

```
ninv=0.96;
```

```
Ppan=0;
```

```
Psfa=0;
```

```
for i = 1:ndatos
```

```
    hora = datos(i,2);
```

```
    irr = irr + datos(i,3);
```

```
    temp = temp + datos(i,5);
```

```
    Ppan = Ppan + datos(i,8);
```

```
    Psfa = Psfa + datos(i,9);
```

```
    Ppv = datos(i,6);
```

```
    Ppre = 1.5;
```

```
    if Ppv > 0
```

```
        Pro = Ppv;
```

```
        Php = Pro-Ppre;
```

```
        Hro = Hro + 1;
```

```
    end
```

```
    mData(cdias,hora+1)=datos(i,7);
```

```
if hora==23
```

```
    mData(cdias,25)=Hro;
```

```
    mData(cdias,26)=irr/24;
```

```
    mData(cdias,27)=temp/24;
```

```
    mData(cdias,32)=Ppan+0.46*6;
```

```
    mData(cdias,33)=11.46*6;
```

```
    mData(cdias,35)=Psfa;
```

```
    Hro=0;
```

```
    irr=0;
```

```
    temp=0;
```

```
    Ppan=0;
```

```
    Psfa=0;
```

```

        cdias = cdias +1;
    end
end

for j = 1:dias
    Pexc=mData(j,1:24);
    Hro=mData(j,25);
    Tsim=1;
    sim('Slv9',Tsim);
    mData(j,28)=Vp(end,2);
    mData(j,29)=Vh2(end,2);
    mData(j,30)=Ppem_u(end,2);
    mData(j,31)=Pfc(end,2);
    mData(j,34)=mH2O(end,2);
end

cdm1=1;
cdm2=0;
s1=10000;
P1=101.325;
s3=66.28;
P3=101.325;
s4=20770;
P4=4281;
Qp=3.008;
Qf=5.781;

for k = 1:12
    cdm2=cdm2+IMes(k);
    Ilrr=mData(cdm1:cdm2,26);
    IVp=mData(cdm1:cdm2,28);
    sVp=sum(IVp);
    mMes(k,1)=sVp;
    IVpf=IVp-18;
    sVpf=sum(IVpf);
    mMes(k,14)=sVpf;
    IVh2=mData(cdm1:cdm2,29);
    mMes(k,2)=max(IVh2);
    mMes(k,3)=mean(IVh2);
    mMes(k,4)=mean(Ilrr);

    Tamb=mean(mData(cdm1:cdm2,27));
    Tmar=lTemp(k);

    Tml=abs((Tamb-Tmar)/log(abs(Tamb/Tmar)));
    h1=SW_Enthalpy(Tml,'C',s1,'ppm',P1,'kPa');
    v1=SW_Volume(Tml,'C',s1,'ppm',P1,'kPa');
    m1=Qf/(3600*v1);

    h2=(m1*h1+1000*Pro)/m1;

```

```
h25=SW_Enthalpy(25,'C',s1,'ppm',P1,'kPa');
h30=SW_Enthalpy(30,'C',s1,'ppm',P1,'kPa');
T2=25+(30-25)*(h2-h25)/(h30-h25);
m2=m1;
```

```
h3=SW_Enthalpy(T2,'C',s3,'ppm',P3,'kPa');
v3=SW_Volume(T2,'C',s3,'ppm',P3,'kPa');
m3=Qp/(3600*v3);
```

```
m4=m2-m3;
h4=(m2*h2-m3*h3)/m4;
h4p=SW_Enthalpy(T2,'C',s4,'ppm',P4,'kPa');
```

```
nro=m3*h3/(m1*h1+1000*Pro);
mMes(k,5)=nro;
```

```
IPpem_u=mData(cdm1:cdm2,30);
mMes(k,6)=sum(IVh2)*33.3/sum(IPpem_u);
IPfc=mData(cdm1:cdm2,31);
sPfc=sum(IPfc);
mMes(k,7)=sPfc;
```

```
IPpan=mData(cdm1:cdm2,32);
sPpan=sum(IPpan);
nsystI=(m3*h3*6*(cdm2-cdm1)/1000)/(sPpan+m1*h1*6*(cdm2-cdm1)/1000);
nsystII=(sum(IVh2)*33.3+m3*h3*6*(cdm2-cdm1)/1000)/(sPpan+m1*h1*6*(cdm2-
cdm1)/1000);
nsystIII=(sPfc+m3*h3*6*(cdm2-cdm1)/1000)/(sPpan+m1*h1*6*(cdm2-cdm1)/1000);
mMes(k,8)=nsystIII;
mMes(k,15)=nsystII;
mMes(k,9)=nsystI;
IPsfa=mData(cdm1:cdm2,35);
sPsfa=sum(IPsfa);
mMes(k,10)=sPsfa;
IProm=mData(cdm1:cdm2,33);
sProm=sum(IProm);
mMes(k,11)=sProm;
lmH2O=mData(cdm1:cdm2,34);
```

```
sPpem_u=sum(IPpem_u);
mMes(k,12)=sPpem_u;
```

```
smH2O=sum(lmH2O);
mMes(k,13)=0.001*smH2O;
cdm1=cdm2+1;
```

end

```
[Vh2max,iVh2max]=max(mData(:,29));
[Vh2min,iVh2min]=min(mData(:,29));
```

```

format bank
yirr=1000*mMes(:,4);
figure(1)
etiquetas={'Ene','Feb','Mar','Abr','May','Jun','Jul','Ago','Sep','Oct','Nov','Dic'};
x=categorical(etiquetas);
x=reordercats(x,etiquetas);
bar(x,yirr)
ylabel('Irradiancia global promedio [W/m^{2}]')
grid on

figure(2)
yVp=mMes(:,1);
bar(x,yVp)
ylabel('Producción de agua desalinizada [m^{3}/mes]')
grid on

figure(3)
yVh2=mMes(:,2:3);
bar(x,yVh2)
ylabel('Producción de hidrógeno [kg/día]')
legend({'Máxima','Promedio'},'Location','northeast')
grid on

figure(4)
yetaH2=100*mMes(:,6);
bar(x,yetaH2)
ylabel('Eficiencia electrolizador [%]')
text(x,yetaH2,string(yetaH2),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
grid on

figure(5)
yetaRO=100*mMes(:,5);
bar(x,yetaRO)
ylabel('Eficiencia planta RO [%]')
text(x,yetaRO,string(yetaRO),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
grid on

figure(6)
yP=round(mMes(:,7),2);
bar(x,yP,'FaceColor',[0.466 0.7 0.188])
ylabel('Energía equivalente disponible en hidrógeno [kWh]')
text(x,yP,string(yP),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
yline(130,':')
grid on

figure(7)
yNsystl=100*mMes(:,9);
bar(x,yNsystl)
ylabel('Eficiencia energética global del sistema I [%]')
text(x,yNsystl,string(yNsystl),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')

```

```
grid on
```

```
figure(8)
yNsystII=100*mMes(:,15);
bar(x,yNsystII)
ylabel('Eficiencia energética global del sistema II [%]')
text(x,yNsystII,string(yNsystII),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
grid on
```

```
figure(9)
yNsystIII=100*mMes(:,8);
bar(x,yNsystIII)
ylabel('Eficiencia energética global del sistema III [%]')
text(x,yNsystIII,string(yNsystIII),'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
)
grid on
```

```
figure(10)
yPro=0.001*mMes(:,11);
yPsfa=0.001*mMes(:,10);
bar(x,yPsfa,'FaceColor',[0.2 0.2 0.5])
hold on
bar(x,yPro,'FaceColor',[0.2 0.55 0.7])
hold off
ylabel('Energía mensual [MWh]')
legend({'Producción','Demanda OI'],'Location','northeast')
grid on
```

```
figure(11)
yPro=0.001*mMes(:,11);
yPropem=0.001*(mMes(:,11)+mMes(:,12));
yPsfa=0.001*mMes(:,10);
bar(x,yPsfa,'FaceColor',[0.2 0.2 0.5])
hold on
bar(x,yPropem,'FaceColor',[0.2 0.55 0.7])
hold on
bar(x,yPro,'FaceColor',[0.1 0.75 0.8])
hold off
ylabel('Energía mensual [MWh]')
legend({'Producción','Demanda OI+PEM','Demanda OI'],'Location','northeast')
grid on
```

```
figure(12)
yVpf=mMes(:,14);
ymH2O=mMes(:,13);
bar(x,yVpf,'FaceColor',[0.2 0.2 0.5])
hold on
bar(x,ymH2O,'FaceColor',[0 0.7 0.7])
hold off
ylim([0 1.8])
```

```
ylabel('Cantidad de agua para electrólisis [m3/mes]')  
legend({'Disponibilidad','Consumo'},'Location','northeast')  
grid on
```

```
figure(13)  
yVh2=11.08*mMes(:,2:3);  
bar(x,yVh2)  
ylabel('Producción de hidrógeno [Nm3/dia]')  
legend({'Máxima','Promedio'},'Location','northeast')  
grid on
```

```
IPpem_u=mData(:,30);  
Ppem_ua=sum(IPpem_u)
```

```
IPpemfc=mData(:,31);  
Ppemfc=sum(IPpemfc)
```

APÉNDICE G – DIAGRAMAS DEL DISEÑO

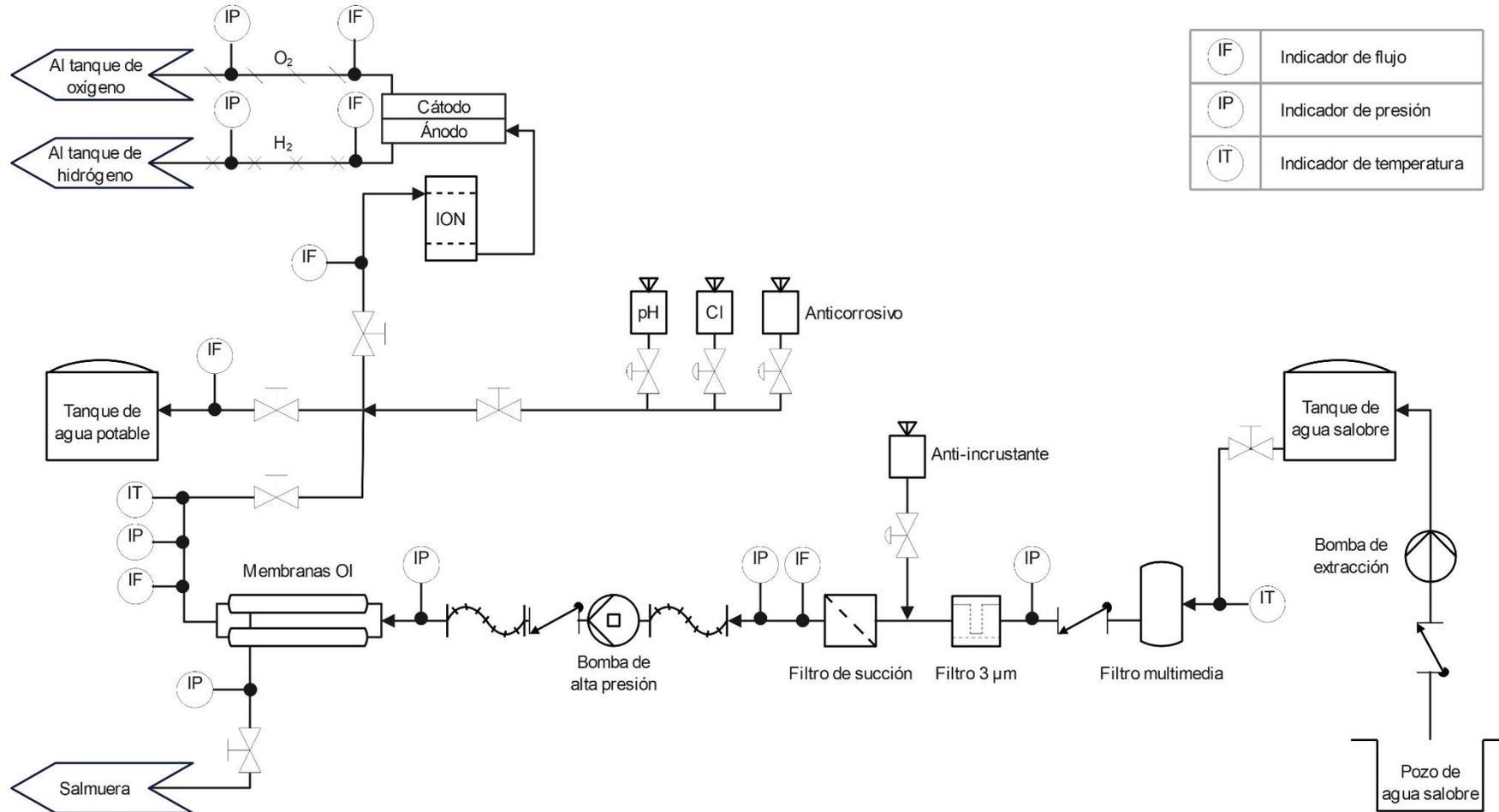


Figura G.1 Diagrama P&ID del sistema integrado

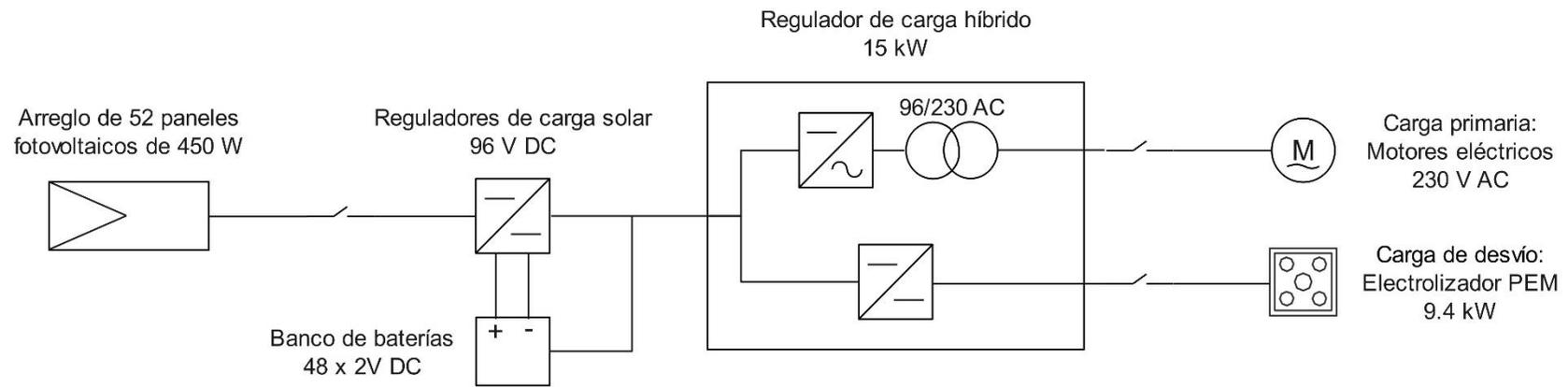


Figura G.2 Diagrama unifilar (SLD) del sistema fotovoltaico autónomo