



Desarrollo conceptual de un sistema modular y descentralizado para la purificación de agua y producción simultánea de energía a partir de fuentes renovables: El caso del centro del Departamento del Atlántico

Orlando M. Olaciregui Fontalvo

Universidad del Norte
Departamento de ingeniería mecánica
Barranquilla, Colombia
2022

Desarrollo conceptual de un sistema modular y descentralizado para la purificación de agua y producción simultánea de energía a partir de fuentes renovables: El caso del centro del Departamento del Atlántico

Orlando M. Olaciregui Fontalvo

Tesis presentada como requisito para optar por el título de:
Magíster en Ingeniería Mecánica

Director:

Habib Zambrano Rodríguez, PhD

Codirector:

Aymer Maturana Cordoba, PhD

Universidad del Norte
Departamento de Ingeniería Mecánica
Barranquilla, Colombia
2022

A mis padres, a quienes les debo todo.

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores Aymer y Habib gracias por su tiempo, explicaciones y por ayudarme a crecer y aprender. A Camila Navia por todo su apoyo y amor en su momento, a Ricardo Mejía, Aggie Cala por su ayuda y disposición, y a mis amigos más cercanos Jesús Cárdenas, Alberto Camargo, Andrés Castañeda, Félix Torrenegra, Efraín Polo y Ángel Cotes. A todos mis compañeros del 6k, fue un verdadero placer conocerlos y trabajar junto a ustedes. A mis padres a quienes le debo todo en esta vida, espero hacerlos sentir orgullosos. Por último, muchas gracias a la gobernación del Atlántico y a Colciencias por brindarme la oportunidad de realizar esta maestría a través de la convocatoria 809.

Resumen

La escasez de agua dulce en época de sequía, sumado a las constantes interrupciones en el servicio de suministro de energía en los municipios del centro del Departamento del Atlántico, ha conllevado a la población al uso de aguas subterráneas al presentar conductividades eléctricas por encima de los niveles recomendados. Actualmente la gobernación, en algunos casos, suministra agua a través de carrotanques que no son suficientes para subsanar las necesidades de los locales. Por ende, emplear una tecnología de desalinización que sea descentralizada y modular podría ayudar a asegurar recursos básicos y aportar al desarrollo de la región. Para esto, se propone desarrollar conceptualmente una alternativa con el fin de tratar agua subterránea, para producir agua potable y de irrigación. El sistema híbrido deberá desalinizar el agua subterránea, para alcanzar los niveles de conductividad establecidos en los estándares colombianos para el agua potable y de riego, $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$. Al mismo tiempo, el sistema deberá producir energía para ser autosuficiente utilizando una fuente renovable.

El diseño conceptual propuesto en este trabajo sigue los lineamientos de la metodología de diseño para manufactura y ensamblaje de Ulrich. Inicialmente, se caracterizaron 3 muestras de agua de pozos localizados en corregimientos del centro del Departamento del Atlántico. A partir de esto, se identificaron los requisitos mínimos para plantear las alternativas de diseño usando tecnologías modernas de desalinización y de producción de energía renovable. También, se evalúa la posibilidad de implementar un sistema de producción de energía por Ósmosis Retardada por Presión aprovechando el Gradiente Salino existente. Los sistemas híbridos propuestos fueron modelados en partes, una de desalinización donde se hace una regresión con un diseño de experimento y se identifican factores significativos, además de ser simulada con el software WINFLOW; y otra de producción de energía, donde se calcula el número de elementos necesarios para ser autosuficiente. Las alternativas que utilizan Energía de Gradiente Salino fueron comparadas calculando la densidad de potencia por medio de un código programado en OCTAVE y utilizando parámetros característicos de la membrana, como la permeabilidad de agua y de soluto. Por último, el dimensionamiento de la alternativa que utiliza energía fotovoltaica fue calculado a partir del consumo necesario por la tecnología de desalinización.

La selección de la alternativa se basa en el análisis comparativo mediante el proceso de jerarquía analítica a partir de características del sistema como: la producción de energía, el consumo energético, la modularidad del sistema y el flujo de agua tratada producida. Como resultado se obtuvo que la opción con paneles solares tiene mejor desempeño que las demás a pesar de requerir mayor área, hasta un 87% más; debido a que necesita menos módulos, hasta 60 módulos, y sus costos son 1.7 veces inferiores en comparación con las que utilizan energía de gradiente salino, cuyas bajas densidades de potencia entre $0.16\text{-}0.36 \text{ W}/\text{m}^2$, por el bajo gradiente salino disponible, hacen de estas alternativas inviables.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	4
Listado de figuras	9
Listado de tablas	11
Listado de abreviaturas y símbolos	13
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Ósmosis inversa (OI o RO por sus siglas en inglés).....	6
2.2. Ósmosis retardada por presión (ORP o PRO, por sus siglas en inglés)	7
2.3. OI+PV.....	8
2.4. OI+WIND.....	10
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....	12
3.1. Análisis de la composición de muestras de agua subterránea	12
3.2. Definición de especificaciones	15
3.3. Análisis de especificaciones	15
3.4. Matriz QFD	15
3.5. Generación de alternativas.....	15
3.6. Evaluación de alternativas.....	15
3.6.1. Modularidad del sistema.....	16
3.6.2. Flujo de agua potable producida.....	18

3.6.3. Cálculo de agua flujo de permeado para irrigación.....	18
3.6.4. Validación experimental del flujo de permeado OI.....	19
3.6.5. Medición de variables fisicoquímicas en OI y ORP.	22
3.6.5. Densidad energética producida por alternativa	24
3.6.5.1. Cálculo de la densidad de potencia para ORP.....	24
3.6.5.2. Parámetros de membrana en configuración OI-ORP.	26
3.6.6. Consumo energético de OI	28
3.6.6.1. Consumo energético teórico	28
3.6.6.2. Consumo energético OI calculado de forma experimental	28
3.7. Cálculo del retorno de la inversión	29
CAPITULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS	30
4.1 Análisis de la composición de muestras de agua subterránea.	30
4.2. Definición de especificaciones	32
4.3. Análisis de especificaciones	32
4.4. Matriz QFD	33
4.5. Análisis funcional.....	34
4.6. Generación de alternativas.....	35
4.6.1. Opción de acoplamiento #1.....	35
4.6.2. Opción de acoplamiento #2.....	36
4.6.3. Opción de acoplamiento #3.....	37
4.6.4. Opción de acoplamiento #4	38
4.6.5. Opción de acoplamiento #5	39
4.7 Evaluación de alternativas	39
4.7.1. Modularidad del sistema.....	39
4.7.2. Cálculo de agua flujo de permeado para irrigación.....	41

4.7.3. Cálculo del flujo de agua de permeado producida	42
4.7.3.1. Validación experimental del flujo de permeado OI.....	43
Medición de variables fisicoquímicas en OI y ORP.	43
4.8. Densidad energética producida por alternativa.....	46
4.8.1. Parámetros de membrana en configuración OI-ORP.	46
4.8.2. Densidad de potencia (W) y modularidad del sistema ORP	48
4.9. Consumo energético de la OI.....	52
4.9.1. Consumo energético de la OI calculado de forma experimental.....	52
4.10. Costos.....	53
4.10.1. Costos alternativas #1	53
4.10.2. Costos alternativas #2	53
4.10.3. Costos alternativas #3	53
4.10.4. Costos alternativas #4	53
4.10.5. Costos alternativas #5	54
4.11. Matriz de decisión: Análisis Jerárquico (AHP).....	55
4.12. Cálculo del retorno de la inversión	56
CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	58
BIBLIOGRAFIA	59
Apéndice A1: Código para el cálculo de la densidad energética en OCTAVE	65

Listado de figuras

Figura 1. Distribución de publicaciones a través del tiempo.....	6
Figura 2. Esquema de construcción de un diseño conceptual	12
Figura 3. Ubicación geográfica donde las muestras fueron tomadas.	12
Figura 4. a. Método volumétrico. b. Método espectrofotométrico. c. Medidor multiparámetro...13	
Figura 5. Muestras de agua en placas Petrifilm incubadas a 30°C durante 24h.....	14
Figura 6. Tipos de colonias que se pueden presentar en una placa de Petrifilm.	14
Figura 7. Esquema de la metodología propuesta por Rosemberg para evaluar modularidad de productos o sistemas.....	16
Figura 8. Conexión entre elementos de membrana dentro del recipiente de presión[58].	18
Figura 9. P&ID de la celda CF042D en Ósmosis Inversa[65].	20
Figura 10. Banco de pruebas de la Universidad del Norte en configuración <i>OI</i>	21
Figura 11. Ensamble de celda CF042D	21
Figura 12. Picnómetro y conductímetro usados para obtener la curva de calibración conductividad vs ppm	22
Figura 13. Chiller en banco de pruebas	23
Figura 14. Motor acoplado a bomba de desplazamiento positivo en banco de pruebas.....	23
Figura 15. Sensor de temperatura y conductividad en el tanque de alimentación.....	23
Figura 16. Montaje para el cálculo del flujo de permeado	24
Figura 17. Magnitud y sentido del flux respecto a la presión hidráulica en una celda [68]–[70].	25
Figura 18. Procedimiento de cálculo de la densidad de potencia de un sistema ORP[71].....	26
Figura 19. Resumen del test RO-FO para el cálculo de los parámetros A, B y S de membranas.	27
Figura 20. Montaje del equipo en el banco de pruebas.	28
Figura 21. Medición del consumo eléctrico con analizador de redes Fluke 435.....	28
Figura 22. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 1. a. Coliformes totales b. Bacterias aerobias.....	30

Figura 23. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 2 a. Coliformes totales b. Bacterias aerobias.....	31
Figura 24. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 1. coliformes totales y bacterias aerobias de la muestra 3.....	31
Figura 25. Caja negra.....	34
Figura 26. Caja transparente.....	34
Figura 27. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 1.....	35
Figura 28. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 2.....	36
Figura 29. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 3.....	37
Figura 30. Configuración de sistema OI y ORP. Alternativa 4.....	38
Figura 31. Configuración de sistema OI- PV. Alternativa 5	39
Figura 32. Esquema de la membrana AK.....	39
Figura 33. Configuración con membrana de NF simulada en WINFLOW.....	41
Figura 34. Curva de la concentración de soluto TDS [ppm] vs conductividad eléctrica [μ S/cm].....	43
Figura 35. Flujo de permeado vs presión	47
Figura 36. Densidad de potencia de diferentes membranas.	48
Figura 37. Densidad energética de las alternativas 1,2, 3 y 4.....	50
Figura 38. Paneles solares BLUETTI SP350	51
Figura 39. HSP mensual de la estación Normal Manatí en el Atlántico[75]	51
Figura 40. Consumo de la bomba de desplazamiento positivo	52
Figura 41. Matriz de rendimiento de las alternativas según los criterios estipulados en el análisis de especificaciones en Expert Choice..	55
Figura 42. Visualización del diseño conceptual.	56

Listado de tablas

Tabla 1. Consumo energético por metro cúbico de agua de mar de diferentes tecnologías.....	4
Tabla 2. Coordenadas de toma de muestras	12
Tabla 3. Restricciones técnicas recomendadas a tener cuenta por la Suez.....	17
Tabla 4. Productos con mayores producción en el departamento del Atlántico y su rendimiento por hectárea [60].	19
Tabla 5. Niveles usados en experimento 2 ⁴	21
Tabla 6. Resultados del análisis de la composición física y química de las muestras.....	30
Tabla 7. Especificaciones iniciales de diseño.....	32
Tabla 8. Matriz 2X2.....	32
Tabla 9. QFD	33
Tabla 10. Dimensiones de la membrana de baja presión AK8040F [58].....	40
Tabla 11. Posibles configuraciones que cumplen con el flujo de permeado requerido.....	40
Tabla 12. Resultados de los TDS y flujos de la simulación en WINFLOW	42
Tabla 13. Datos obtenidos al realizar la curva de calibración del conductímetro.	43
Tabla 14. Resultados de flujo de permeado en experimento 2 ⁴	44
Tabla 15. Resultados de conductividad del permeado en experimento 2 ⁴	45
Tabla 16. Significancia de los factores en OI.....	45
Tabla 17. Factores usados en el experimento 2 ⁴	46
Tabla 18. Condiciones de operación para el cálculo de A.....	46
Tabla 19. Tiempo de cambio de 1 g de agua en 4 diferentes presiones y flujos de permeados obtenidos.....	46
Tabla 20. .Condiciones de operación para el cálculo experimental de B.....	47
Tabla 21. Datos de flux obtenido para el cálculo de B.....	47
Tabla 22. Parámetros usados para el cálculo numérico de S.....	48
Tabla 23. Parámetros A, B, y S de diferentes membranas	48

Tabla 24. Consumo de la bomba en OI calculado por WINLFOW	52
---	----

Listado de abreviaturas y símbolos

AHP		Analytic Hierarchy Process
FO		Forward osmosis
WIND		Wind power
PV		Photovoltaic
QFD		Quality Function Deployment
MD		Membrane distillation
CTA		Cellulose triacetate membrane
ED		Electrodialysis
RED		Reverse electrodialysis
SGE		Salinity gradient energy
SWRO		Sea water reverse osmosis
OI		Osmosis inversa
ORP		Ósmosis retardada por presión
NF		Nanofiltración
HSP		Horas solar pico
k		Coefficiente de transferencia de masa
C _b	[g/m ³]	Concentración del flujo de alimentación
C _p	[g/m ³]	Concentración del flujo de permeado
σ	[uS/cm]	Conductividad
i _v		Constante de Van Hoff
R _g	[Pa m ³ /mol K]	Constante universal de los gases
W	[kWh/m ²]	Densidad de potencia
η _{turbina}		Eficiencia de la turbina
η _{generador}		Eficiencia del generador
η _{motor}		Eficiencia del motor
Q _D	[m ³ /s]	Flujo de equilibrio
\dot{m}	[m ³ /s]	Flujo de permeado
Q _p	[m ³ /s]	Flujo producido por la osmosis directa a través de la membrana
J _w	[Lmh]	Flux
f	[Hz]	Frecuencia
M _s		Masa molecular de soluto
S	[um]	Parámetro estructural
A	[m ³ /m ² s Pa]	Permeabilidad de agua
B	[m ³ /m ² s]	Permeabilidad de soluto
P	[Pa]	Presión hidráulica
Δπ	[Pa]	Presión osmótica
R		Rechazo
T	[K]	Temperatura
u _f	[m/s]	Velocidad de flujo de alimentación
u _d	[m/s]	Velocidad de flujo de equilibrio
H _c	[m]	Altura del canal de la celda
L _c	[m]	Longitud del canal de celda
D	[m ² /s]	Coefficiente de difusividad

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La cercanía del Río Magdalena, la mayor fuente de agua dulce del Atlántico, representa un beneficio para el departamento. Sin embargo, en los municipios centrales que no colindan con el río, se utilizan otros recursos como las aguas subterráneas para satisfacer las necesidades agropecuarias y de consumo de la región, sobre todo en épocas de escasez. De hecho, de los 23 municipios del Atlántico solamente 12 de estos poseen un servicio de agua potable continuo[1]. Localidades como Isabel López, un corregimiento de Sabanalarga, sufren por no contar con un servicio de suministro de agua continuo, confiable y de calidad que pueda utilizarse en los sistemas de riego y menos para su consumo. Actualmente, se emplea carrotanques para el suministro de agua potable en esta población[2]. Sin embargo, este esfuerzo es insuficiente para satisfacer las necesidades de los habitantes de estas comunidades, debido a que los carrotanques suministran el agua solamente durante dos días a la semana y cada familia tiene derecho a un balde de agua potable por familia.

Adicionalmente, el embalse del Guájaro, la fuente de agua más cercana ha perdido cerca de 4 mil hectáreas de espejo de agua, debido al impacto de fenómenos como el del Niño en el país durante el 2014-2016 y el cierre de la boca de los caños que alimentan la ciénaga, aumentando los caudales sólidos[3]. Además el 85% de los residuos producidos por los municipios a su rivera son arrojados directamente a las aguas [4]. Esto junto a la deficiente cobertura de servicios de saneamiento ha producido una escasez de agua potable. También, la producción agrícola se ha visto afectada en época de sequía, debido a la falta de disponibilidad de agua, lo que ha llevado a las comunidades a usar aguas subterráneas que tienen menor calidad, por la mayor salinidad que presentan y la posible presencia de metales. Cuando la concentración de sales en el agua de riego es excesiva se puede ver una disminución en el crecimiento del cultivo ya que se saliniza el suelo. Esto se conoce como Salinización, y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) lo define como el proceso de aumento, ganancia o acumulación de sales en el perfil del suelo[5].

“La concentración de sales en el perfil superior de la tierra (donde se desarrollan las raíces) ocasiona la disminución y pérdida de la capacidad productiva de los suelos. En otras palabras, las sales disminuyen la presencia de microorganismos que permiten la dinámica y fijación de determinados nutrientes que hacen más apto (fértil) un suelo para la agricultura”[6]. Como resultado de investigaciones científicas como las de Flipp y Sela se ha concordado que tanto la calidad del agua de riego en especial los niveles de salinidad, como el manejo adecuado del riego son esenciales para la producción exitosa de cultivos e influye en la estructura del suelo [7][8]. Un tratamiento fisicoquímico del agua subterránea, con el objetivo de eliminar esas características no deseables para la irrigación del suelo conllevaría a prevenir la salinización de los suelos y por ende se evita esperar varios años a que el suelo recupere sus características para el cultivo; naturalmente, aumentando la producción agrícola y la economía del departamento.

Según el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible existen bajos niveles de conocimiento, preparación técnica y académica sobre las aguas subterráneas, además los trabajos realizados para realizar los reporte técnicos acerca de las concentraciones de sales en el agua subterránea empleada en los municipios del centro del Departamento del Atlántico no son permanentes por lo que la información que se encuentra no está actualizada[9]. Por lo que es

esencial realizar una caracterización de estas aguas en la región. Sin embargo, se tiene certeza sobre la existencia de una de las principales causales de la salinidad de los suelos, como es el uso indebido de agua subterránea para la irrigación de cultivos. Omar Franco, director del IDEAM, advierte que “a la región Caribe debe hacerse un seguimiento importante y advertir el alto grado de deterioro en la calidad de los suelos”[6]. Debido a que se utiliza agua subterránea en época de sequía, es de suma importancia encontrar una solución para su tratamiento y adecuado uso. Por ende, en este trabajo se plantea: ¿Qué diseño conceptual modular y descentralizado que produzca simultáneamente agua y energía a partir de fuentes de agua subterránea, puede ser eventualmente aprovechado en el centro del Departamento del Atlántico?

1.2 Hipótesis

Es aplicable un sistema híbrido de tratamiento de agua y producción de energía simultáneo basado en alternativas de energía renovable en los municipios del centro del departamento del Atlántico.

1.3 Justificación

El agua y la energía son elementos esenciales para tener una economía en desarrollo sostenible [10]. Sin embargo, el Departamento del Atlántico es, después de La Guajira, el departamento más seco de Colombia con ausencia de ríos o corrientes que bañen su territorio interno, siendo las únicas fuentes hídricas en época de verano los humedales y el río Magdalena, del cual se extrae y potabiliza el agua para los municipios más grandes [11]. Dado que en condiciones promedio los municipios del Atlántico muestran una alta probabilidad (amenaza) de tener eventos de sequía unidos a elevadas temperaturas y a la alta vulnerabilidad natural [12]; la falta de agua afecta directamente la producción agrícola y su consumo esencial para la vida. Debido a la problemática planteada anteriormente es imperioso encontrar una solución energética alterna de base renovable. Por esta razón, se busca una solución para el mejoramiento de la calidad del agua a partir de fuentes subterráneas de agua potable, teniendo en cuenta que este sistema sea completamente independiente y autosostenible. Adicionalmente, deben considerarse las siguientes razones:

- Es necesario preparar a la Región Caribe y al país para afrontar los efectos que se presentan, y los que se puedan presentar debido al cambio climático, y especialmente sus implicaciones en materia de disponibilidad de agua y energía.
- La situación actual de muchos municipios de la Región Caribe en términos de agua potable, es de total dependencia de algunos ríos como el Magdalena, entre otros, y aunque actualmente el Magdalena sea un río caudaloso y la calidad del agua sea apta para potabilización, es necesario buscar alternativas para asegurar un abastecimiento apropiado a futuro.
- La importancia de controlar la salinidad del agua de irrigación de cultivos es consecuente con el control de la calidad de suelo y el aumento de la competitividad de la Región Caribe y del País.
- Existe poca información científica experimental suficiente que sustente, explique y documente el funcionamiento de un sistema de suministro simultáneo de agua y energía, lo cual constituye una brecha en el conocimiento.

- El presente proyecto está alineado con los siguientes objetivos de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, establecidos por las Naciones Unidas: Agua limpia y Saneamiento, Energía asequible y no contaminante, producción y consumo responsable.

1.4 Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar conceptualmente de un sistema modular y descentralizado para el tratamiento de agua y producción energía eléctrica, que pueda eventualmente ser aprovechado para el suministro de agua potable y riego de cultivos, a partir de fuentes de agua subterráneas del centro del Departamento del Atlántico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Establecer el diseño conceptual de alternativas de sistemas de tratamiento de agua y producción de energía simultánea a partir de las tecnologías actuales y el análisis de la composición fisicoquímica y bacteriológica de muestras de agua en al menos tres fuentes de un municipio seleccionado del centro del Departamento del Atlántico.
- Evaluar las alternativas de diseño establecidas, su funcionamiento y rendimiento a partir de validaciones experimentales y del modelado utilizando los programas OCTAVE y WINFLOW.
- Seleccionar la alternativa que mejor se adapte a las necesidades de suministro de agua y energía de la región, cumpliendo la legislación aplicable.

CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE

La necesidad de tener que desalinizar el agua subterránea en municipios del centro del Departamento del Atlántico, plantea un reto adicional debido a las deficiencias en la cobertura de la red eléctrica, por lo cual la necesidad de disminuir la energía requerida por el dispositivo se hace imperioso. Teóricamente, para producir agua dulce a partir de agua de mar, la energía mínima requerida es de 0.7 kW/m^3 [13], [14]. Esto sugiere que para agua salobre la energía requerida será menor. Aunque había sido posible reducir la energía requerida por la ósmosis inversa (OI), un método de desalinización por membrana, a un valor entre $1.5\text{-}4 \text{ kWh/m}^3$ en los últimos años [14], [15]. Actualmente, el mayor costo en la producción de permeado en OI es el consumo de energía debido a la alta presión que necesita esta tecnología para superar la presión osmótica y lograr la desalinización[16]. Por lo tanto, el desarrollo de sistemas de procesamiento masivo de agua salina ha llevado a investigar prototipos que consuman menos energía o que produzcan su propia energía a través de fuentes renovables como fotovoltaica (PV) o eólica (WIND) o la Energía Azul.

Entre las técnicas de desalinización, la más popular y conocida en todo el mundo es la OI, actualmente es el proceso más utilizado a nivel global [17] debido a su alta eficiencia. Junto con la Electrodiálisis (ED), son los procesos más eficientes energéticamente para desalinizar el agua de mar en comparación con los procesos térmicos como la destilación flash (MSF), la destilación multietapa (MED) y otros procesos convencionales cuyo rango de consumo eléctrico por metro cúbico de agua producida se puede observar de la *Tabla 1* y que toma como referencia la desalinización de agua de mar de diferentes procesos. Esta diferencia en el consumo entre procesos térmicos y por membrana se debe principalmente porque estos últimos se basan en el cambio de fase del agua que implica una alta demanda de energía [18].

Tabla 1. Consumo energético por metro cúbico de agua de mar de diferentes tecnologías

Tipos de agua	Proceso	Consumo [kW/m^3]	Referencias
Agua de mar	SWRO	1.8 – 4	[14]
Agua de mar	ED	0.7 – 5.5	[19]
Agua de mar	MED	14.5 – 21.6	[20]
Agua de mar	MSF	19.5 – 27.3	[20]
Agua superficial	Tratamiento de agua convencional	0.079	[21]

A pesar del desarrollo de esta tecnología la desalinización se lleva a cabo como último recurso para suplir la escasez de agua, debido a que es un proceso de un gran consumo energético. Debido al incremento en la escasez de agua potable, se ha vuelto relevante en la comunidad científica investigar y desarrollar este tipo de tecnologías creando nuevos diseños y optimizando los diferentes parámetros de operación [22].

El presente estado del arte ha sido desarrollado utilizando la siguiente metodología que se resume en 3 pasos:

- **Identificar**

En este caso, se utilizó la búsqueda en “Scopus” como "hybrid systems" AND "desalination" la que arrojó los siguientes resultados “hybrid system” AND “water and energy production” AND "water and energy production" AND "reverse osmosis" se obtuvieron 111 artículos como resultado de esta búsqueda.

La revisión bibliográfica en otra base de datos como lo es Web of science arrojó 240 resultados utilizando las palabras “hybrid systems” AND “reverse osmosis” AND “energy production” de los cuales se realizó la discretización de estos artículos. Además, se utilizó 217 artículos obtenidos de diferentes bases de datos que mencionan la producción simultánea de agua y energía. Para un total de 568 artículos que se tomaron en cuenta para la realización de este estado del arte. Además, todas las bases de datos utilizadas fueron revisadas nuevamente a comienzos del 2022.

- **Clasificar, elegir e incluir**

Para la revisión bibliográfica de las diferentes tecnologías de tratamiento de agua y producción energía simultánea. Solo se tuvo en cuenta sistemas de desalinización que utilicen tecnologías de membrana y que produzcan energía a través de energía de gradiente salino, o cualquier otro tipo de proceso de producción de energía alternativa a la de combustibles fósiles. A partir de esto, la discretización de los artículos obtenidos se realizó teniendo en cuenta el resumen del documento y la conclusión. Siguiendo estos lineamientos se seleccionaron 152 artículos relacionados con la temática y que cumplen con los criterios mencionados anteriormente.

- **Descripción de la muestra**

Como se puede observar en la Figura 1 se produjeron un incremento en el número de artículos desde el 2015 aproximadamente, también se puede denotar que gran parte de los artículos son publicados en las revistas Desalination, Journal of Membrane Science, Renewable and Sustainable Energy Reviews.

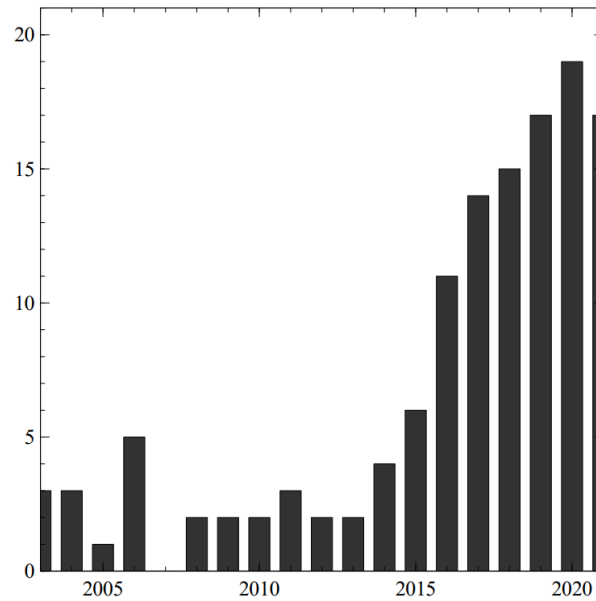


Figura 1. Distribución de publicaciones a través del tiempo

- **Características de los estudios encontrados**

Aspecto investigado	Alcance del campo	Categoría
Tecnología	Brindan los conceptos básicos y diferentes configuraciones entre diferentes tecnologías de desalinización y producción de energía	Destilación por membrana-Electrodiálisis inversa
		OI - ORP
		OI - PV
		OI - WIND
Optimización	Brindan aspectos y falencias donde las tecnologías actuales de sistemas híbridos tienen oportunidades de mejora	Ensamblamiento en membranas
		Materiales en membranas y destiladores solares
	Brindan índices y metodologías para evaluar el rendimiento de sistemas híbridos	Densidad de potencia
		OI-ORP-TEST
Aplicación geográfica y enfoque	Brindan lugares o locaciones en donde se han aplicado las diferentes tecnologías de sistemas híbridos y su rendimiento	Emiratos Árabes Unidos (OI-PV)
		Japón (OI-ORP)
		Arabia Saudí (OI - PV)
		Islas Canarias (OI - WIND - PV)

2.1. Ósmosis inversa (OI o RO por sus siglas en inglés)

La demanda mundial de producción de agua dulce ha llevado al desarrollo de procesos de desalinización y uno de ellos fue la creación de la OI, que se puede definir como el movimiento de un disolvente a través de una membrana semipermeable que idealmente no permite el paso del soluto, de una solución más concentrada a una solución menos concentrada debido al vencimiento de la presión osmótica por una fuerza externa. Debido a la poca caída de presión del agua desalinizada y la salmuera remanente, existen diferentes configuraciones para aprovechar la energía de estas líneas de alta presión y reducir la demanda energética necesaria para aumentar la eficiencia en la OI como el uso de turbocargadores y turbinas Pelton que son dispositivos de recuperación de energía.

La desalinización es posible gracias a las membranas semipermeables, que son materiales compuestos laminados, cuyas diferentes capas permiten el paso del solvente, pero no de los solutos. Existen diferentes tipos de membranas, pero las más usadas son las membranas de película delgada (TFC, por sus siglas en inglés). Este tipo en específico consta de dos capas diferentes hechas de diferentes materiales. La capa superior o parte activa se prepara mediante la técnica de polimerización interfacial y es aquella que evita el paso del soluto. Mientras, el sustrato microporoso o capa de soporte se fabrica comúnmente a través de una técnica de inversión de fase seca-húmeda y es aquella que le brinda las propiedades mecánicas a la membrana.

Existe otro proceso de desalinización llamado Nanofiltración (NF) que cuenta con membranas orgánicas y consume menor cantidad de energía, pero no es muy utilizado para desalinizar debido a que retira iones polivalentes y solo retira moléculas grandes de iones monovalentes. Aunque, los altos desempeños de los sistemas OI y NF se deben al desarrollo y mejoramiento de polímeros condensados cuyo origen empezó con la síntesis del nylon que no fue creado hasta 1937[6]. El desarrollo de membranas para desalinizar ha sido de interés desde hace varios siglos. La primera membrana sintética semipermeable fue hecha de una película gelatinosa de ferrocianuro de cobre por Traube en 1867 y en la actualidad el desarrollo de membranas se ha centrado en la producción de membranas capaces de seleccionar con precisión entre especies macromoleculares, incluida la producción de membranas “inteligentes” o funcionales, que son muy selectivas para determinados productos químicos, o más resistentes a la suciedad [7].

2.2. Ósmosis retardada por presión (ORP o PRO, por sus siglas en inglés)

La ósmosis por presión retardada es uno de los métodos usados para generar energía a partir de gradientes salinos, este es un proceso de conversión de energía de presión osmótica basada en membrana. El sistema ORP utiliza el flujo osmótico a través de una membrana semipermeable para generar electricidad [9]. Al transformar el trabajo de flujo de agua producido por el gradiente de presión osmótica (una de las propiedades coligativas de las soluciones) [23]; de la línea de concentración más baja a la línea de mayor concentración. El desarrollo de la tecnología ORP, según Touati fue el resultado de la comprensión de la ósmosis directa (FO, por sus siglas en inglés) y de la disponibilidad de mejores membranas que soportaran las condiciones del proceso entre eso las presiones y temperaturas necesarias para su implementación y la implementación de modelos matemáticos para predecir el flujo de agua a través de la membrana [10].

El primer estudio de la osmosis fue atribuido al clérigo francés Abbé Nollet en 1748. Pero no fue hasta 1954 que el investigador R. E. Pattle en la revista científica Nature, menciona por primera vez la posibilidad de obtener energía a partir de la presión osmótica generada por una membrana semipermeable y la mezcla de agua de río con agua de mar. A pesar de esta publicación se tuvo poco interés en la investigación de esta tecnología hasta que Sidney Loeb junto con Srinivasa Sourirajan desarrollan el sistema ORP y patentan el primer prototipo conocido que utiliza esta tecnología llamada “heat engine”, utilizando un destilador y un sistema de membranas semipermeables para crear energía, fue patentado en 1974. Desde entonces y gracias al mejoramiento de la resistencia de membranas en 2009 se inauguró en Noruega la primera planta de generación eléctrica por osmosis creada por la empresa Statkraft, demostrando que es posible generar energía a partir de esta tecnología pero dejó de producir energía a partir de este recurso en el 2014[11], seguramente debido a que el proceso es influenciado por la temperatura del agua y en Noruega las temperaturas son bajas por lo que la eficiencia del proceso decae[12].

La Energía Azul es la energía producida por la mezcla controlada de dos masas de agua con concentraciones de sales distintas debido a la diferencia de energía potencial química, también llamada energía de gradiente salino (SGE, por sus siglas en inglés)[24], [25]. Esta forma de energía renovable es la más prometedora y menos conocida, ya que se estima que puede cubrir el 80% de la demanda mundial de energía de la población si llegara a aplicarse en todas las desembocaduras de los ríos [25].

Un sistema híbrido puede consistir en combinar más de una tecnología en el proceso. Existen sistemas híbridos que utilizan las tecnologías de tratamiento de agua potable como la de OI, junto con las tecnologías de producción de energía a partir de SGE como las de ORP o Electrodiálisis inversa o reversible (EDR o RED, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, S. H. Chae en 2018 comparó el rendimiento de los sistemas híbridos OI-ORP-MD con OI-ORP [26]. Ambos con dispositivos de recuperación de energía. En estos procesos se emplean sistemas de circulación de energía con el uso de un intercambiador de presión, este módulo es ampliamente utilizado debido a la eficiencia que proporciona al proceso, estos módulos transfieren la energía de la corriente de rechazo directamente a la nueva corriente de agua de mar. Esta conexión directa permite una eficiencia real de transferencia de energía neta desde la corriente de rechazo a la corriente de alimentación de más del 95% al 97% [27][26]. Aunque algunos problemas con el intercambiador de presión se han reportado con respecto a la mezcla de las corrientes, puesto que no existe una barrera física en el dispositivo, estos módulos siguen siendo ampliamente usados en la actualidad [28].

La eficiencia de estos sistemas híbridos mencionados puede ayudar potencialmente a aliviar la escasez de agua y las demandas energéticas [29]. Por ejemplo, S. Senthil et al. Propone el sistema OI + ORP con diferentes intercambiadores de presión, concluyendo que en comparación con el que hace la mezcla directa de salida de dibujo ORP diluida con agua de alimentación de SWRO ayudó a reducir el consumo de energía específico neto (NSEC) en un 49% en comparación con el sistema de desalinización SWRO estándar [30].

Estos trabajos de investigación demuestran un gran potencial del uso conjuntivo de los sistemas de OI y de ORP junto con dispositivos de recuperación de energía para el tratamiento de agua desalinizada y la producción de energía.

2.3. OI+PV

La energía solar contribuye a la capacidad general de energía renovable en muchos sistemas diferentes, de hecho, ha sido la más intensamente estudiada, especialmente en Medio Oriente y América del Norte debido a las áreas con escasez de agua y alta irradiación [31]. Entre todos los sistemas que utilizan paneles fotovoltaicos, los siguientes investigadores estudiaron su nexo con la desalinización bajo varias condiciones y mencionan algunas consideraciones que se deben tener en cuenta al diseñar un sistema alimentado con esta fuente de energía.

En 2008 Hela et al. [32] realiza una consideración importante en el uso de paneles fotovoltaicos en ambientes con altas temperaturas y es que las celdas solares de silicio cristalino se deterioran y decrece su rendimiento con el aumento de la temperatura, de hecho la eficiencia disminuye en aproximadamente un 0.4% por cada grado centígrado. Este efecto debe tenerse en cuenta al

dimensionar un panel solar y al seleccionar inversores, ya que se debe dar alta prioridad a aquellos paneles solares con baja sensibilidad a altas temperaturas ambientales[33].

En 2007 Ortiz et al. [34] demostraron la viabilidad de la desalinización de agua salobre por electrodiálisis a través de un sistema alimentado directamente con paneles solares fotovoltaicos. Cuando se utilizaron 8 paneles fotovoltaicos, el proceso de desalinización tomó 0.35 horas en variar la concentración de Cl y la capacidad de producción de agua potable del sistema alcanzó aproximadamente $0.29 \text{ m}^3 / \text{h}$. Sin embargo, cuando el número de paneles fotovoltaicos se redujo a la mitad, el tiempo del proceso de desalinización se incrementó a 0.45 h, mientras que la capacidad de producción de agua potable se redujo a $0.22 \text{ m}^3 / \text{h}$.

Por otro lado, Duong et al. [35] diseñaron un sistema a escala piloto para producir agua potable mediante una combinación de procesos de destilación por membrana UF/OI y air gap (AGMD) utilizando energía solar como fuente de energía. Además, se observó que al agregar antiescalante se alcanzaba valores de recuperación de agua del 80%. El consumo específico de energía térmica observado y el consumo específico de energía eléctrica fueron de 250 kWh/m^3 y 1.1 kWh/m^3 , respectivamente.

Asimismo, Freire-Gormaly et al. [36] desarrollan un modelo para crear agua potable utilizando la insolación solar específica del sitio para estimar la producción diaria de energía. El modelo del sistema de tratamiento de agua estima el ensuciamiento de la membrana en función del tiempo para esta operación intermitente, basándose en trabajos experimentales anteriores. Esto fue necesario ya que el ensuciamiento de la membrana de la operación intermitente resulta en una disminución de la permeabilidad de la membrana diferente a la operación continua.

Los mismos autores mencionados anteriormente evaluaron la necesidad de considerar el ensuciamiento en el diseño de un sistema de ósmosis inversa alimentado por energía fotovoltaica. El sistema se probó bajo dos condiciones: sin considerar el ensuciamiento y luego se simuló durante 10 años bajo diferentes casos de ensuciamiento. El número de paneles fotovoltaicos seleccionados para la configuración óptima fue mucho menor cuando no se consideró ningún ensuciamiento [37]. Además, para tamaños de sistema más grandes ($5 \text{ m}^3 / \text{día}$ y $10 \text{ m}^3 / \text{día}$) el costo anualizado del sistema fue significativamente mayor cuando se consideró el ensuciamiento. El costo anualizado del sistema de $5 \text{ m}^3 / \text{día}$ considerando el ensuciamiento fue un 19% más caro que el mismo sistema sin considerar el ensuciamiento. Mientras que el costo anualizado del sistema para el sistema de $10 \text{ m}^3 / \text{día}$ teniendo en cuenta el ensuciamiento fue un 31% más caro que el sistema optimizado sin considerar el ensuciamiento.

Por otro lado, al diseñar un sistema PV hay que tener en cuenta un problema principal ocasionado para la energía fotovoltaica y la energía renovable a gran escala, y es la integración con la red eléctrica. Dado que algunas redes eléctricas tradicionales no pueden soportar la generación de tanta energía. Se requeriría una alta capacidad en la red eléctrica para soportar grandes plantas de desalinización. Pero si es posible el implementar sistemas grandes de desalinización de energía PV conectados a la red. Por ejemplo, en Arabia Saudita existe una planta OI + PV en Al Khafji que produce $60000 \text{ m}^3 / \text{día}$ que se controla de acuerdo con la energía solar disponible y está conectada a la red [28].

2.4. OI+WIND

Los sistemas de desalación eólica son una de las desaladoras renovables más frecuentes, especialmente para zonas costeras que presentan una alta disponibilidad de recursos eólicos[38], [39]. Además, entre los diversos recursos de energía renovable, la integración de procesos de desalinización como una OI con energía eólica tuvo el menor impacto en el medio ambiente, con una importante reducción del impacto ambiental del 75% [40]. Por lo tanto, en áreas de alto potencial eólico donde también se requiere desalinización, la energía eólica es la opción de fuente de energía preferida [39].

Los sistemas de ósmosis inversa acoplada con energía eólica se han estudiado desde 1960 por su capacidad de generación de energía para ser utilizados por sistemas de desalinización, como la ósmosis inversa (OI), especialmente en zonas costeras donde la velocidad del viento es mayor y se puede generar más energía [41]. Sin embargo, debido a la alta fluctuación de la velocidad del viento, la mayoría de las plantas de desalinización existentes utilizan la energía eólica solo como fuente de alimentación auxiliar, ya sea en un sistema híbrido de energía eólica con diésel o conectando las plantas a la red para que la electricidad pueda usarse cuando la energía eólica no es suficiente para la operación de la planta [41]. Además, el principal problema al que se enfrenta este sistema híbrido radica en limitar la frecuencia de puesta en marcha y parada de la planta de ósmosis inversa [42] debido a las características de falta de acumulación de energía que tienen los aerogeneradores sin la presencia de baterías de almacenamiento. [43]. Como consecuencia, se reduce la disponibilidad de energía, así como se incrementan los costos de la planta en operación [44]. Esta es la razón por la que, debido a la alta fluctuación de la velocidad del viento y la alta presión osmótica directamente impulsada OI + Wind no se recomiendan, por lo tanto, la mayoría de las plantas de desalinización existentes utilizan la energía eólica solo como fuente de alimentación auxiliar, ya sea en un sistema híbrido de energía eólica con diésel o conectando las plantas a la red para que la electricidad se pueda utilizar cuando la energía eólica no es suficiente para la operación de la planta [41].

Es posible encontrar muchos trabajos de investigación en la literatura científica que han esbozado las fuentes de energía renovable (RE) como una herramienta estratégica para reducir el consumo específico de energía (SEC). A partir de 1984, se construyó el primer prototipo registrado que utiliza la energía eólica para desalinizar el agua salobre. Este sistema tenía una capacidad de producción de 200 m³/día con un consumo de energía de 5 kWh/m³ [45], [46], [47]. Otras plantas híbridas cuyo uso de diésel y combustibles eólicos son la fuente de energía, como en la isla de Fuerteventura en España (1993) y Drepanon en Grecia (1995) se han desarrollado para apoyar la necesidad de agua potable [48] con el menor consumo de energía posible. Mientras tanto, en Perth, Australia, en 2006, se inició el proyecto para implementar una planta desaladora alimentada por energía eólica, mediante el empleo de turbinas, que obtuvo una capacidad de 80 MW y una producción diaria de 140.000 m³/día [44], [48] una de las plantas más grandes construidas de este tipo. A principios de 2003 de la Nuez Pestaña diseñó una planta de OI desalinización convencional a pequeña escala con una serie de modificaciones debido al régimen variable para la fluctuación de la energía eólica, ya que la planta estaba conectada directamente a un sistema eólico sin almacenamiento de energía. La potencia eléctrica se daba por medio de un variador de velocidad y habían comprobado que cuando la recuperación aumentaba se

observaba una disminución del consumo. Desde 5.4 kW/m^3 cuando el rechazo es del 20%, hasta un consumo de 4.2 kW/m^3 cuando el rechazo es del 40% [44].

Respecto a otros sistemas de ósmosis inversa combinados con energía eólica, Witte propuso en 2003 un interesante diseño llamado WindDeSalter que integra un solo módulo con el depósito de agua de mar, el tanque de almacenamiento de agua potable, la unidad de pretratamiento y las unidades de desalinización, todos estos elementos se combinan en el convertidor de energía eólica [49].

Aunque la energía eólica tiene sus limitaciones a gran escala, es una opción interesante y factible de implementar, especialmente en áreas costeras con altas velocidades de viento. Además, la energía eólica es la segunda alternativa más utilizada y más interesante para acoplarla con sistemas de desalación[50]

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

Durante el desarrollo del diseño conceptual es importante tener en cuenta una metodología adecuada que ayude al planteamiento del sistema. En esta parte del proyecto se utilizará la morfología de diseño propuesta por Karl Ulrich e implementada en el trabajo de Morris Asimow; la metodología de diseño para la fabricación y ensamble o DFMA (por sus siglas en inglés)[51]. En ésta el diseño conceptual es el primer paso en el proceso de diseño[52]; seguido del diseño básico y del diseño a detalle; y tiene como objetivo analizar diferentes alternativas para evaluar su viabilidad técnica y seleccionar la mejor entre ellas [53]. En la Figura 2 se presentan las etapas que se empleó en el proyecto:

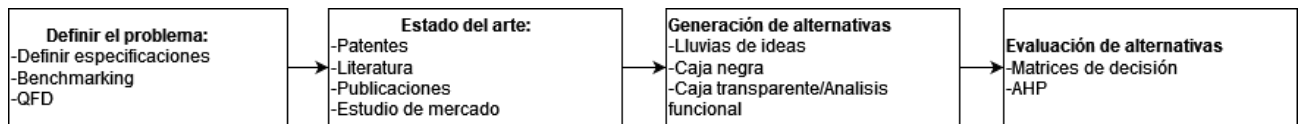


Figura 2. Esquema de construcción de un diseño conceptual

3.1. Análisis de la composición de muestras de agua subterránea

Antes de la definición de especificaciones se debe realizar un análisis de las fuentes de agua disponible, por lo tanto, se seleccionaron 3 muestras en diferentes puntos en el centro del departamento del Atlántico cuya ubicación se presenta en las siguientes coordenadas:

Tabla 2. Coordenadas de toma de muestras

MUESTRA	COORDENADAS
POZO #1	10°40'55.4"N 74°59'58.8"W
POZO #2	10°40'20.4"N 74°51'29.7"W
POZO #3	10°40'18.8"N 74°51'29.7"W

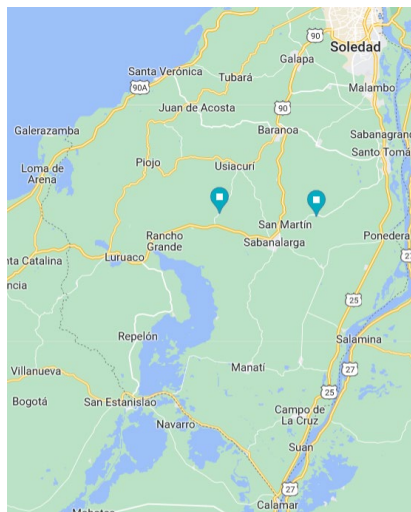


Figura 3. Ubicación geográfica donde las muestras fueron tomadas.

Las muestras de agua analizadas fueron tomadas a través de pozos construidos por la comunidad local y transportados hasta las instalaciones de la Universidad del Norte, donde se analizó las características de cada una, siguiendo los procedimientos del *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*[54].

La Alcalinidad, los Cloruros y la dureza total fueron analizados a través del método volumétrico, que consiste en tomar 50 ml de cada muestra y agregar unas gotas de un indicador, ya sea Naranja de Metilo, o Negro Eriocromo, y un reactivo hasta observar un cambio de color significativo. Los valores del volumen del reactivo añadido se anotan y se calculan utilizando las siguientes ecuaciones:

$$ALCALINIDAD \left(\frac{mg}{L} \right) = (A) * (B) * 50000 / C \quad (1)$$

Donde:

A= Volumen gastado de Ácido Sulfúrico

B= Normalidad del Ácido Sulfúrico (0.02 N)

C= Volumen de la muestra titulada (ml)

$$CLORUROS \left(\frac{mg}{L} \right) = (A) * (B) * 35450 / C \quad (2)$$

Donde:

A= Volumen gastado de Nitrato de Plata

B= Normalidad del Nitrato de Plata (0.1 N)

C= Volumen de la muestra titulada (ml)

$$DUREZA \text{ TOTAL} \left(\frac{mg}{L} \right) = (A) * 1000 / (B) \quad (3)$$

Donde:

A= Volumen de EDTA 0.01 M gastado (ml)

B= Volumen de la muestra titulada (ml)



Figura 4. a. Método volumétrico. b. Método espectrofotométrico. c. Medidor multiparámetro

Los Sulfatos, Nitratos, Nitritos, Fosfatos y Hierro fueron medidos a través de un espectrofotómetro UV/VIS Hach DR5000. Además, las características físicas como pH, porcentaje de oxígeno disuelto, conductividad, TDS, salinidad y turbidez fueron proporcionados por un medidor multiparámetro HI 9829.

Adicionalmente, se realizaron pruebas de coliformes a muestras de agua de estos pozos para evaluar el nivel bacteriano presente. Se tomaron 3 placas Petrifilm de coliformes totales y 3 placas de Petrifilm de bacterias aeróbicas marca 3M. Los métodos analíticos de conteo usados son los presentados en el programa de la *Association of Analytical Communities* [55].

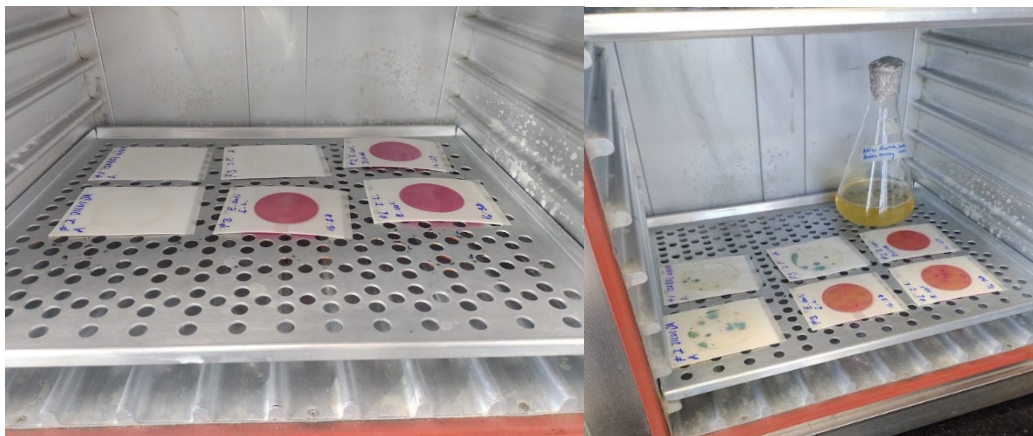


Figura 5. Muestras de agua en placas Petrifilm incubadas a 30°C durante 24h

Para realizar el conteo se toma 1ml de la muestra y se coloca en el centro del Petrifilm para luego ser esparcido por un dispersor. Después, todas las muestras fueron colocadas en una incubadora durante 24 h a por lo menos 30 °C. Y finalmente, las colonias pueden ser contadas con una lupa con luz, si el número de colonias exceden en más de 150 colonias se puede determinar el promedio por un cuadrado representativo y multiplicar este valor 20.

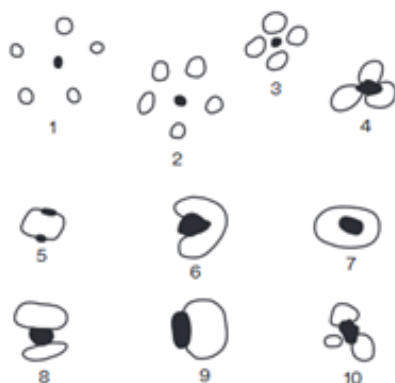


Figura 6. Tipos de colonias que se pueden presentar en una placa de Petrifilm.

3.2. Definición de especificaciones

En esta etapa se plantea la definición de una serie de especificaciones que deben converger entre sí para lograr una definición de qué es lo que debería esperarse del diseño propuesto; es decir, describir la necesidad y que se espera del diseño conceptual.

3.3. Análisis de especificaciones

Al definir las especificaciones se identifican características que describen conceptos del sistema y que se miden a través de variables ingenieriles con un objetivo deseado. En la llamada matriz 2 a 2, se encuentra la predominancia de cada una de las características del sistema y se comparan entre ellas, obteniendo un peso relativo, el cual sería el porcentaje de importancia de cada característica que se utiliza en el despliegue de la función de calidad (QFD, por sus siglas en inglés).

3.4. Matriz QFD

En el QFD relacionan varias matrices entre ellas se presentan los conceptos de las características identificadas en las especificaciones iniciales con sus pesos relativos y se identifican con variables ingenieriles medibles, además de ponderar la dependencia entre estas variables al tener en cuenta si son directa o inversamente proporcional entre ellas. Como resultado podemos obtener el peso relativo de cada variable y su importancia para tener en cuenta al momento de evaluar la factibilidad de cada configuración.

3.5. Generación de alternativas

Para la creación de las diferentes alternativas se utiliza una caja negra que relaciona el sistema con su medio, sus entradas y salidas. En este diagrama las sustancias entran y salen en flechas color negro y las diferentes formas de energía en flechas color rojo. Además, las señales y los elementos de instrumentación se pueden identificar con una línea puntada.

Luego se realiza la caja transparente que relaciona de manera neutral el funcionamiento del sistema para demostrar las interacciones entre las entradas sin necesidad de plantear una solución particular. Es importante aclarar que en esta etapa de deducción del proceso no se tiene en cuenta el pretratamiento ya que es el diseño del sistema de tratamiento de agua y producción de energía y no las etapas previas a este.

Del análisis funcional del sistema y a partir del estado del arte se plantearon 5 alternativas que implementan producción de energía y agua tratada y cuya posibilidad de ser aplicadas en el centro del Atlántico será evaluada.

3.6. Evaluación de alternativas

Una vez planteado el problema y reconociendo las posibles soluciones que cumplan los criterios de decisión, se procede a evaluar el desempeño de cada una de las alternativas según las características y variables ingenieriles identificadas en el QFD. Para esto, se utilizaron experimentos y softwares de cómputo, se identificaron los factores que influyen el proceso y se modela el sistema. Por último, se selecciona la alternativa a través del Proceso analítico jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), la cual es una técnica que priorizar las alternativas de acuerdo con

cada requerimiento y resuelve un problema de criterios múltiples para identificar la alternativa más conveniente. Esto lo hace al ponderar las alternativas frente a los criterios de decisión, y jerarquizando los criterios de decisión para calcular la suma ponderada de cada alternativa. A continuación, se explicará la metodología usada para calcular el rendimiento de cada alternativa en algunos de los criterios obtenidos en el QFD como son: modularidad, flujo de agua tratada producida, costos, y consumo energético.

3.6.1. Modularidad del sistema

La arquitectura de un sistema describe el esquema por medio del cual sus funciones son asignadas a los componentes físicos[56]. Un sistema puede ser pensado en términos funcionales y físicos. El elemento funcional consiste en las operaciones individuales o transformaciones que contribuyen al rendimiento general del producto. Los elementos físicos son las partes, componentes y las relaciones entre estos o interfaces que implementan la función[56]. Este trabajo evalúa un objetivo importante y es la peculiaridad de que se pueda identificar desde el diseño conceptual la modularidad del sistema, siguiendo los lineamientos de la arquitectura de producto este sistema híbrido posee una modularidad en su multifunción, es decir, existe un módulo para la producción de energía y otro para el tratamiento de agua potable y agua de irrigación, además los elementos físicos que componen cada función deben estar ensamblados en base a una interfaz similar, ya que, en caso de que se requiera aumentar la capacidad de producción de flujo de permeado o energía, se tenga la facilidad de agregar según se necesite uno o varios elementos.

Para definir modularidad de las alternativas se sigue la metodología propuesta por Rosemberg, la cual establece pasos lógicos, presentados en la Figura 7, para la obtención del portafolio de productos y propone unos lineamientos que podrían aplicarse en el desarrollo de sistemas mecánicos.

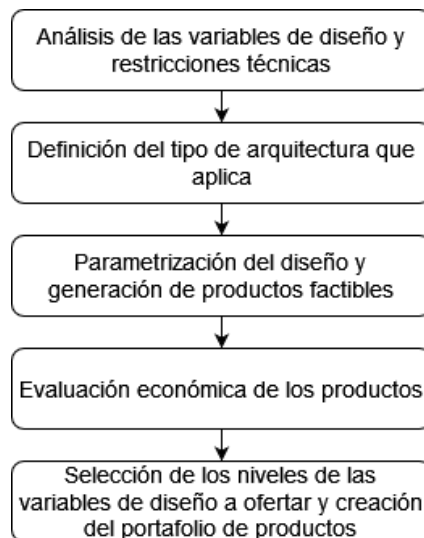


Figura 7. Esquema de la metodología propuesta por Rosemberg para evaluar modularidad de productos o sistemas

En la ósmosis inversa existen restricciones técnicas dadas por lo general por el flujo de permeado en la membrana y las propiedades mecánicas de esta. La Suez como guía de diseño en el tratamiento de agua subterránea sugiere tener en cuenta los siguientes parámetros:

Tabla 3. Restricciones técnicas recomendadas a tener cuenta por la Suez.

Parámetro	Condición	Unidad	Valor
Flujo de permeado para agua subterránea	Max	Lmh	30.56
	Rango típico	Lmh	24-31
Recuperación por elemento (recovery)	Max (flux >18gfd)	%	15
	Max (flux <12gfd)	%	22
Flujo máximo de alimentación	16"	m ³ /h	68.1
	8"	m ³ /h	17.0
	4"	m ³ /h	3.6
	2.5"	m ³ /h	1.4
Mínimo flujo de concentrado	16"	m ³ /h	7.3
	8"	m ³ /h	1.8
	4"	m ³ /h	0.5
	2.5"	m ³ /h	0.1

Existen diferentes tipos de arquitectura modular[52]:

- Ranura: Donde existe un elemento central y cada interface se relaciona de manera diferente, por lo tanto, sus componentes no pueden intercambiar las interfases entre sí.
- Bus: Existe un elemento central en el cual se conectan todos los componentes físicos a través del mismo tipo de interfaz.
- Seccional: No existe un elemento central y todos los elementos interactúan en un solo tipo de interfaz.
- Apilamiento: Se produce cuando el cuerpo del sistema está formado por módulos iguales que se apilan al conectarse entre sí mediante un mismo tipo de interfase

En lo descrito anteriormente aplicado al sistema híbrido se tiene un principio de modularidad de apilamiento. Entre las ventajas de este tipo de personalización se encuentra que facilita la fabricación de sistemas de grandes dimensiones, simplifica el diseño y es posible extender el sistema al facilitar el ensamble de los módulos que se repiten, facilitando la configuración del montaje en el lugar de destino, y si las conexiones son reversibles, facilita la reconfiguración y el mantenimiento [57].

En el caso de la parametrización del diseño se parte desde el flujo de permeado total producido (Fp), el modelo de la maquina dispondrá el tipo de configuración y la membrana utilizada planteará el tamaño del recipiente de presión. Para seleccionar la membrana se tiene en cuenta una forma de clasificación de las membranas comerciales que es según su aplicación, por ejemplo, para remover

productos farmacéuticos, desalinizar agua de mar, o desalinizar agua salobre esta última también llamada de baja energía.

Además, dentro de cada contenedor de presión se encuentran las membranas o también llamados “elementos” configurados en serie, de aquí el principio de apilamiento. El cómo se dispone la cantidad de membranas no es estandarizado. Aunque, por lo general vienen en arreglos de 3, 4, 6 o 7 elementos de membrana y cada uno de estos pueden ser de 2.5”, 4”, 8” o 16” .

Estas se interconectan entre sí dentro del contenedor de presión de la siguiente forma:

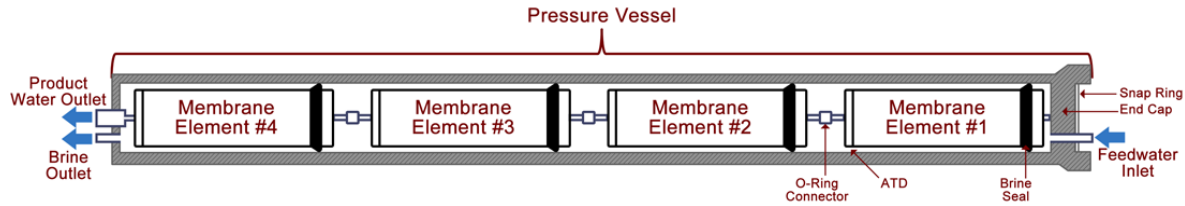


Figura 8. Conexión entre elementos de membrana dentro del recipiente de presión[58].

Se puede estimar el número de recipientes de presión (N), utilizando el rango típico de flujo de permeado (Jw) y el área activa por elemento (AA) y la tasa de agua tratada producida (Fp), aplicando la formula siguiente:

$$Fp = N \times AA \times Jw \quad (4)$$

A partir de esto y la definición de especificaciones es posible calcular las diferentes configuraciones posibles que cumplen con la tasa de producción requerida de agua tratada.

3.6.2. Flujo de agua potable producida

Para la definición de especificaciones la primera consideración para tener en cuenta es conocer el flujo de agua tratada a producir. Para lo cual, es necesario la cantidad de habitantes de la población estudiada. Las muestras de agua subterránea se obtuvieron en corregimientos de Sabanalarga, y según el DANE este municipio cuenta con aproximadamente 92.283 personas[59], pero son solamente algunos de sus corregimientos los que no disponen de suministro de agua. Sin embargo, no se tiene la distribución de la población en los aproximadamente 23 corregimientos y veredas, pero si la totalidad de la población rural en el departamento (3898 personas) y se diseña un sistema descentralizado, por lo tanto, se realiza el cálculo a partir de parte de la población rural para satisfacer la demanda de 1300 personas. Además, se debe tener en cuenta la resolución 0330 de 2017, que establece la dotación neta por habitante según la altura promedio sobre el nivel del mar en cuyo caso es 140 L/persona*día.

3.6.3. Cálculo de agua flujo de permeado para irrigación

En cuanto al tratamiento de agua para irrigación se consideró la desalinización de agua necesaria para la yuca al ser el cultivo con la mayor producción agrícola que se presenta en el departamento del Atlántico según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [60]. La producción de este

cultivo es bajo a nivel local, ya que tiene un rendimiento de 10 t/ha, en comparación a cuando se dispone de un adecuado sistema de riego cuyo valor podría ser de hasta 30t/ha [61]. Un sistema de irrigación adecuado por goteo provee 170 m³/ha de agua a la semana en un ambiente con un clima seco como el que se encuentra al centro del departamento del Atlántico [62].

Tabla 4. Productos con mayores producción en el departamento del Atlántico y su rendimiento por hectárea [60].

Producto	Tipo	Producción [ton]	Rendimiento [ton/ha]
Yuca	Anual	68222.942	10.017
Mango	Permanente	32610.939	16.287
Maíz	Transitorio	16066.146	1.673

En cuanto a la calidad de agua de riego Wu and Dodge clasifican la tolerancia a las sales de diferentes cultivo incluido el de la yuca y en esta clasificación identifican una alta tolerancia, es decir, no hay disminución de producción observable con una concentración de 600 mg/L de sodio y 900 mg/L de Cloro[63]. Miyamoto et al, son más específicos y mencionan que una conductividad de 1200 μ S/cm y unos TDS 800 ppm en el agua son ideales para que crezca la yuca[64]. Debido al rango de conductividad necesario y el nivel de cloruros, para el agua de irrigación un proceso que puede reducir costo y la cantidad de consumo de energía es la nanofiltración. Y se debe evaluar como solución para desalinizar aguas subterráneas. Teniendo en cuenta esto se debe seleccionar la membrana de NF para producir el flujo de permeado mínimo requerido teniendo en cuenta su área activa y un flujo de permeado de 3.07 m³/día.

En resumen, para producir agua de riego en el sistema se tomó en cuenta ciertas consideraciones, como lo son:

- El cultivo para analizar es de la yuca al ser el producto con mayor producción en el departamento.
- La tecnología para desalinizar es la nanofiltración (NF), ya que el rechazo de los TDS es mayor que la de la ultrafiltración y su consumo es menor al de la osmosis inversa.
- El flujo de permeado necesario para una hectárea de cultivo de yuca es de 3 m³/h.
- La conductividad eléctrica del agua debe ser menor de 1200 μ S/cm.

3.6.4. Validación experimental del flujo de permeado OI

Se realiza un experimento 2⁴ completo en un banco de pruebas en la Universidad del Norte, los resultados sirven para evaluar la significancia de los factores que influyen en el proceso de desalinización y poder encontrar una ecuación de regresión de la variable de respuesta, además de validar el flujo de permeado en una membrana de OI.

Debido a que los factores que más influyen en la ósmosis inversa para maximizar el flujo de permeado son la presión, la temperatura, el nivel de salinidad y el flujo masico del flujo de alimentación. Se utiliza un banco de pruebas con una celda CF042D y una válvula luego de la celda para incrementar la presión en la línea de alimentación; un chiller MM7 PolyScience para controlar la temperatura del agua de alimentación; un sensor de temperatura y conductividad para verificar la temperatura en el tanque y la salinidad del agua de alimentación y de permeado; y un variador de frecuencia para controlar el flujo de suministro de la bomba.

La configuración dada por el fabricante para la utilización de la celda en OI es la presentada en la Figura 9.

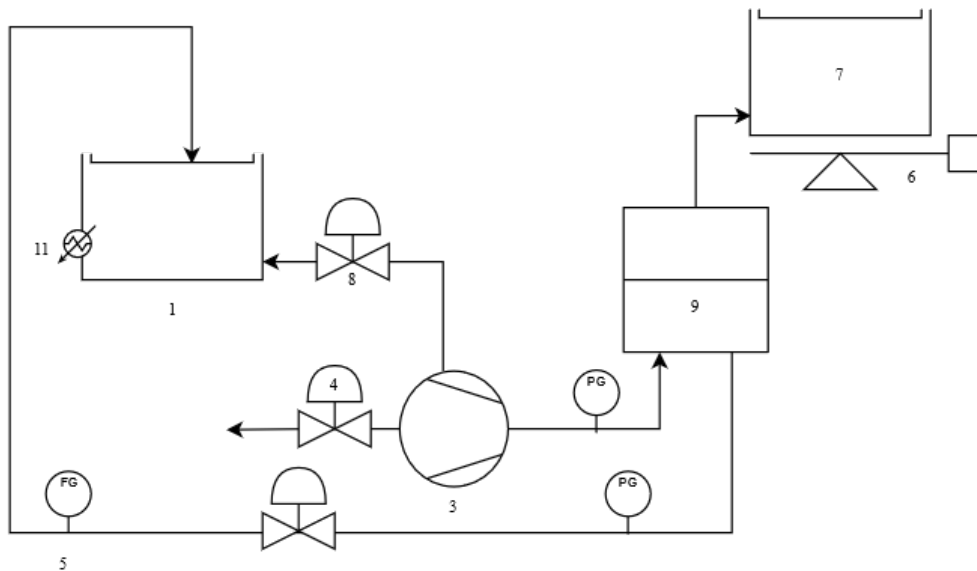


Figura 9. P&ID de la celda CF042D en Ósmosis Inversa[65].

Donde el listado de partes es:

1. Tanque de alimentación
2. Válvula de alivio
3. Bomba de alimentación
4. Válvula de drenaje
5. Rotámetro
6. Balanza
7. Probeta
8. Bypass de retorno
9. Celda CF042D
10. Válvula de control de concentrado
11. Chiller
12. Variador de frecuencia

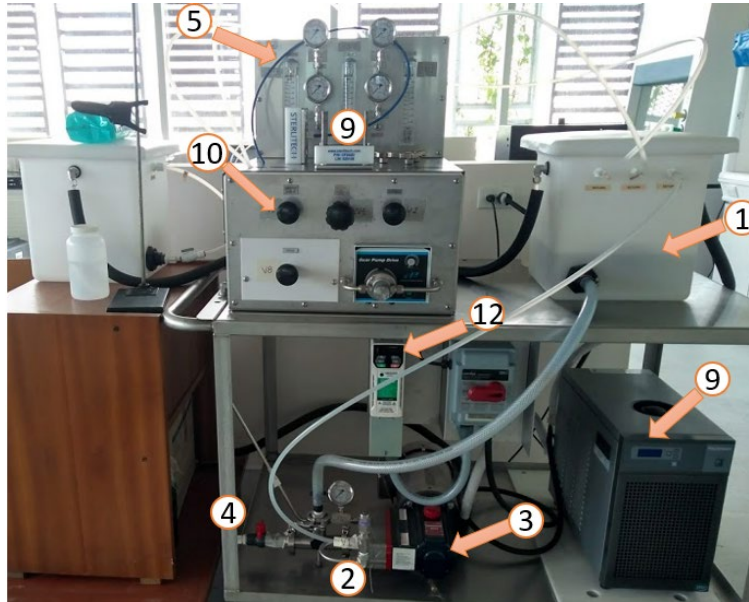


Figura 10. Banco de pruebas de la Universidad del Norte en configuración OI.

Los factores mencionados son variables controlables del proceso, por lo que se seleccionaron los niveles presentados en la Tabla 5, la variable de respuesta es el flux o flujo de permeado por unidad de area. La celda usada tiene un área activa de membrana de 42 cm²

Tabla 5. Niveles usados en experimento 2⁴.

Presión	50	psi	100	psi
Temperatura	25	°C	40	°C
Concentración	3000	uS/cm	7000	uS/cm
Frecuencia	20	Hz	60	Hz

Hay que tener en cuenta, que se deben aleatorizar las corridas y comprobar los principios de homocedasticidad, independendencia y normalidad. Los resultados se usarán también para modelar el flujo de la membrana en la celda y calcular el consumo de energía por metro cubico de agua.



Figura 11. Ensamble de celda CF042D

3.6.5. Medición de variables fisicoquímicas en OI y ORP.

Entre los parámetros que más afectan el flujo de permeado por unidad de área o flux en el sistema de OI se encuentra la concentración de soluto en la solución ya que esta influye directamente en la presión osmótica.

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi) \quad (5)$$

Por lo tanto, una mayor concentración conlleva a una mayor presión osmótica y esto a su vez conlleva a una mayor presión hidráulica y consumo eléctrico necesarios para que el agua sea desalinizada. Por el contrario, en el sistema ORP una mayor concentración produce una mayor densidad de potencia y por lo tanto una mayor producción de energía.

La conductividad eléctrica es una medida directamente proporcional a la concentración de soluto en la solución[66]. Para el banco de pruebas se utiliza un conductímetro como se muestra en la Figura 12 y la siguiente curva de ppm de NaCl vs conductividad:

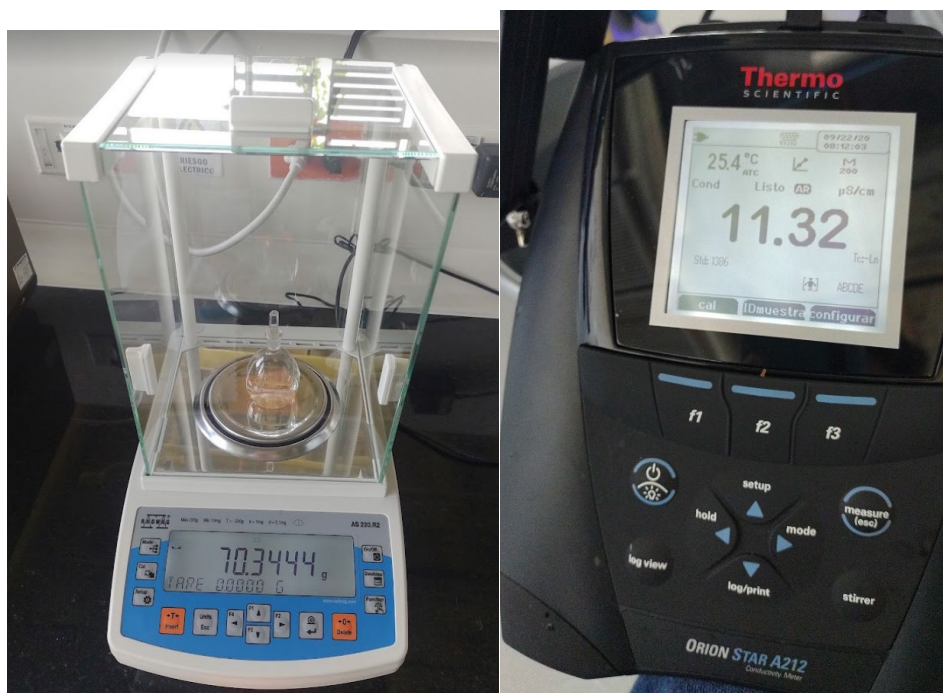


Figura 12. Pícnómetro y conductímetro usados para obtener la curva de calibración conductividad vs ppm

Para obtener al curva de calibración del equipo Orion Star A212 se utilizó agua destilada y NaCl y un picnómetro para realizar la regresión de lineal de los valores de conductividad obtenidos y relacionarlos con las ppm de NaCl.

También, el conductímetro utilizado también tiene un sensor de temperatura para determinar los cambios de temperatura en el flujo de alimentación. Los cambios de temperatura en la corriente de alimentación se realizan con un chiller presentado en la Figura 13.

Además, se cuenta con un variador de frecuencia del motor de la bomba, como se muestra en la Figura 14, con el cual se puede controlar el flujo volumétrico de alimentación y el flujo volumétrico

de equilibrio. Este variador de frecuencia altera también el consumo eléctrico ya que en el banco de pruebas el consumo radica en el motor monofásico acoplado a la bomba y en el chiller.

Es importante tener en cuenta que los flujos se miden directamente a través de rotámetros y este es una medida directa de la velocidad de flujo cruzado (uf). Porque la velocidad “uf” [m/s] se calcula dividiendo el flujo volumétrico [lpm o gpm] entre el área de la sección transversal [m²].



Figura 13. Chiller en banco de pruebas



Figura 14. Motor acoplado a bomba de desplazamiento positivo en banco de pruebas



Figura 15. Sensor de temperatura y conductividad en el tanque de alimentación

El flujo de permeado se deposita en una probeta y para su cálculo se tiene una balanza, como se muestra en la Figura 16 y se registra el tiempo de cambio por cada gramo de agua hasta completar un mínimo de 30 ml, los tiempos se promedian y se utiliza la Ecuación 4:

$$\dot{m}[\text{kg/s}] = \frac{1 \text{ kg}}{\text{tiempo promedio por cada gramo de agua}} \quad (6)$$



Figura 16. Montaje para el cálculo del flujo de permeado

3.6.5. Densidad energética producida por alternativa

3.6.5.1. Cálculo de la densidad de potencia para ORP

En la literatura se comparan diferentes membranas de ORP y sus configuraciones a través de la densidad de potencia de superficie [W/m^2] que es definida como la potencia producida por unidad de área de membrana [67]. Por lo general es calculada como el producto del flujo de permeado que atraviesa la membrana o flux y la presión transmembrana.

$$W = J_w * \Delta P \quad (7)$$

El maximizar la densidad de potencia indica una mayor eficiencia de la membrana y del proceso en general ya que se obtiene un mayor trabajo. y la máxima densidad de potencia es alcanzada en ORP cuando la diferencia de las presiones osmóticas de las soluciones de equilibrio y de alimentación alcanzan el doble de la presión hidráulica

$$\Delta P = \frac{\Delta \pi}{2} \quad (8)$$

$$W_{max} = A \left(\frac{\Delta \pi}{2} \right)^2 \quad (9)$$

Donde π es la presión osmótica y A es la permeabilidad de la membrana [Lmh/bar]. La Figura 17 presenta la variación y sentido del flujo que atraviesa la membrana con respecto a la diferencia de la presión hidráulica; la pendiente de la línea inclinada representa el parámetro A de la membrana. Además, la intersección es la diferencia de presión hidráulica entre corrientes y cuando se supera el sistema se encuentra desalinizando y cuando es menor se puede aprovechar el flujo para producir energía mediante ORP.

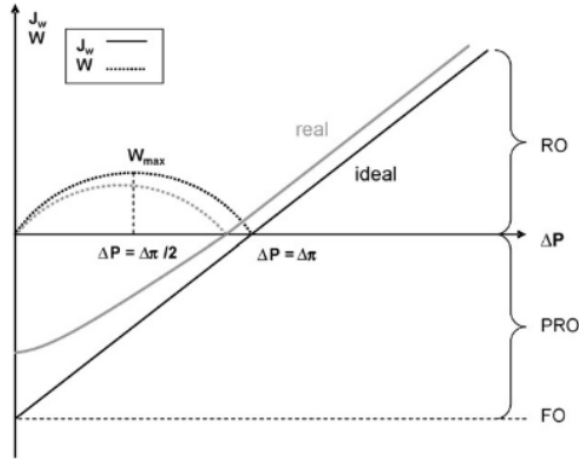


Figura 17. Magnitud y sentido del flux respecto a la presión hidráulica en una celda [68]–[70].

$$\Delta\pi = i_v * \Delta C_m * Rg * T / Ms \quad (10)$$

La diferencia de la presión hidráulica se puede calcular con la ecuación (4). Donde, i_v es el coeficiente de van't Hoff, ΔC_m es la diferencia de concentración en la capa activa de la membrana, Rg es la constante universal de los gases, T es la temperatura y Ms es la masa molecular del soluto. Aunque, la diferencia de la concentración en la capa de soporte y activa de la membrana es diferente al de las soluciones de alimentación y de equilibrio debido a la difusión de soluto a través de la membrana. A este problema se le conoce como ICP y ECP y disminuye el flujo de permeado a través de la membrana. Por lo tanto, se debe ajustar el cálculo de la presión osmótica utilizando el flujo de soluto (J_s) que depende de las características de la membrana A , B , S utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta C_m = \frac{C_{Db} * e^{\frac{-Jw * \partial_D}{D}} - C_{Fb} * e^{\frac{Jw * (\partial_f + S)}{D}}}{1 - \frac{B}{Jw} * e^{\frac{-Jw * \partial_D}{D}} + \frac{B}{Jw} * e^{\frac{Jw * (\partial_f + S)}{D}}} \quad (11)$$

Siendo ∂_D y ∂_f el espesor de capa donde ocurre la diferencia de concentraciones en la membrana

$$\partial_D = \frac{D}{Kd} \quad (12)$$

$$\partial_f = \frac{D}{Kf} \quad (13)$$

Para incluir una aproximación de la concentración real en la membrana se debe utilizar el método propuesto por Naguib et al. [71] que se presenta en el siguiente esquema:

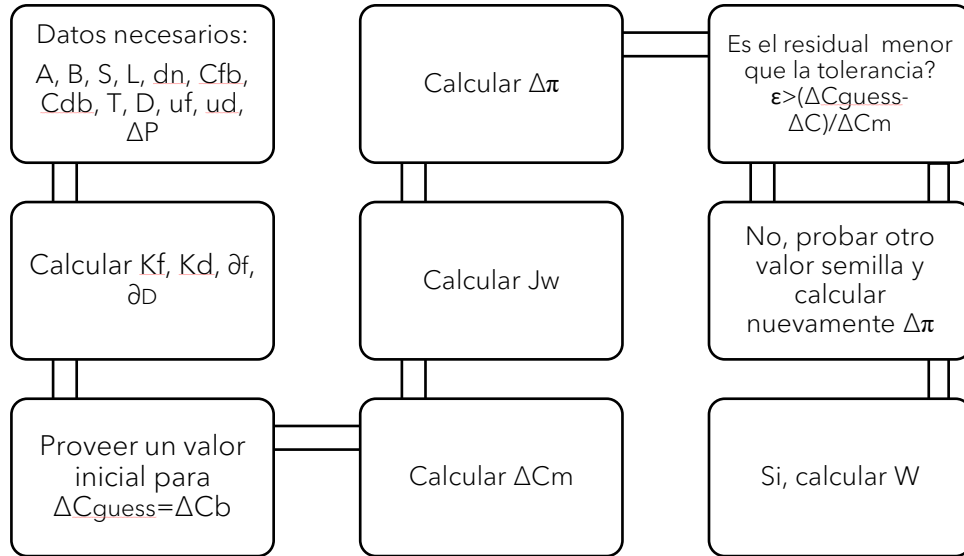


Figura 18. Procedimiento de cálculo de la densidad de potencia de un sistema ORP[71].

Los parámetros K_f y K_d son dependientes de la celda y se calculan de la siguiente forma:

$$K_f = 1.62 * \left(\frac{u_f * D^2}{H_{cf} * L_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

$$K_d = 1.62 * \left(\frac{u_d * D^2}{H_{cd} * L_c} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Siendo H_c la altura del canal de la celda donde se encuentra la membrana, L_c la longitud del canal, u_f y u_d la velocidad del flujo de alimentación y del flujo de arrastre y el coeficiente de difusividad de la sal (D) igual a $1.5E-9$ m/s.

Identificadas las variables involucradas en el proceso de producción de energía se realiza un código en Octave v.6.2.0 y presentado en el Apéndice A1, que calcula la densidad de potencia a partir de los parámetros de la membrana, geometría de la celda, velocidades de flujos, y concentraciones de sales en agua. Los resultados de la densidad de energía calculada, la modularidad, entre otras características identificadas en el QFD serán discutidos en el siguiente capítulo.

3.6.5.2. Parámetros de membrana en configuración OI-ORP.

En cuanto al cálculo de los parámetros de membrana: permeabilidad de agua (A), permeabilidad de soluto (B) y capa soporte (S). Para obtenerlos se utiliza el test RO-FO, una metodología ampliamente usada para calcular experimentalmente los parámetros mencionados [72]. La metodología se resume en la Figura 19:

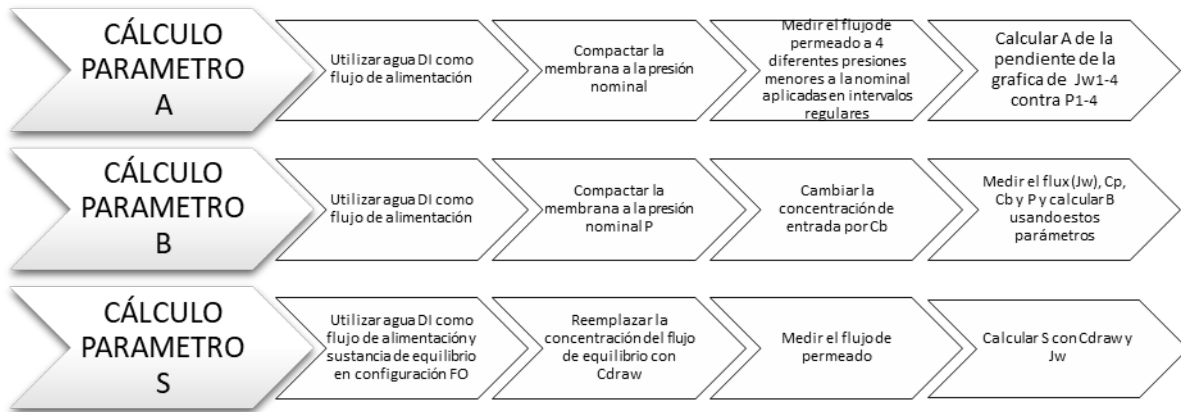


Figura 19. Resumen del test RO-FO para el cálculo de los parámetros A, B y S de membranas

Calcular el parámetro A consiste en probar diferentes presiones en la membrana y medir el flujo de permeado de esta, al final se grafica el flujo de permeado contra la presión y la pendiente es una aproximación de A utilizando la siguiente ecuación 5:

$$J_w = A(\Delta\pi \pm \Delta P)$$

En cuanto al parámetro B se tiene que compactar la membrana a una presión P y concentración del flujo de alimentación Cb, y luego medir el flujo de permeado o flux y la concentración de permeado Cp. Por último, se calcula el parámetro B usando las siguientes ecuaciones:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_b} \quad (16)$$

$$B = J_w \left(\frac{1-R}{R} \right) \exp \left(-\frac{J_w}{k} \right) \quad (17)$$

Donde R es el rechazo y Jw es el rechazo observado en el test y k es el coeficiente de transferencia de masa[73].

Por el último el parámetro S[μm] que representa la capa de soporte de la membrana y es una medida de la porosidad y el espesor de la membrana y se puede calcular con el flujo y la presión osmótica[73] [61]:

$$J_w = \frac{D}{S} \ln \left(\frac{A\pi_{D,b} + B}{A\pi_{F,b} + J_w + B} \right) \quad (18)$$

Finalmente, para calcular la potencia total producida por la configuración PRO se debe tener en cuenta la eficiencia de la turbina y el generador el flujo, además del área total de la membrana de osmosis directa y la presión en la línea de equilibrio.

$$\dot{Q}_P = \int J_w dA_m \quad (19)$$

Siendo Q_P el flujo producido por la osmosis directa a través de la membrana y Q_D el flujo en la línea de equilibrio.

$$W_{gross} = (\dot{Q}_P + \dot{Q}_D) * \Delta P * \eta_{turbina} * \eta_{generador} \quad (20)$$

3.6.6. Consumo energético de OI

3.6.6.1. Consumo energético teórico

El consumo energético en el sistema OI es dependiente de factores como la eficiencia de la bomba y el motor y la presión en las líneas que alimentan el sistema y el flujo volumétrico de alimentación.

$$W_{bomba} = \frac{\dot{Q} * \Delta P}{\eta_{bomba} * \eta_{motor}} \quad (21)$$

3.6.6.2. Consumo energético OI calculado de forma experimental

Para el cálculo de forma experimental en el banco de pruebas que se encuentra en la Universidad del Norte presentado en la Figura 10. Se utiliza un analizador de redes Fluke 435 (Figura 21). En este caso , el equipo se conectó al banco de pruebas y se midió el consumo eléctrico en intervalos de tiempos iguales mientras se configuró la bomba de desplazamiento positivo a diferentes presiones.



Figura 20. Montaje del equipo en el banco de pruebas.



3.7. Cálculo del retorno de la inversión

Para el cálculo del retorno de la inversión, primero se deben realizar los costos operaciones anuales del diseño conceptual si estuviera conectado a una red eléctrica convencional. A partir de esto, se deben realizar recálculos de los números de paneles solares necesarios debido al aumento del consumo de la bomba debido a las pérdidas por las cargas de tubería y elevación que requiere el sistema. Debido a esto, se requiere la potencia de freno que se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$bhp = \frac{\dot{Q} * H_{necesaria} * \rho * g}{\eta_{bomba}} \quad (22)$$

Donde $H_{necesaria}$ es la carga hidrostática neta necesaria de la bomba en metros y se calcula mediante la ecuación de energía:

$$H_{necesaria} = \frac{P_2 - P_1}{\rho * g} + \frac{V_2 - V_1}{2g} + (z_2 - z_1) + h_L \quad (23)$$

Donde h_L es la pérdida debido a las irreversibilidades del sistema y se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

El factor de fricción (f), se obtiene del diagrama de Moody y K_L de los accesorios. Con esto y la presión necesaria del sistema se calcula la cabeza de la bomba. Con la curvatura del rendimiento de la bomba con la cabeza de la bomba y el flujo volumétrico se obtiene la eficiencia de esta en su punto de operación. Con ello se recalcula la inversión del CAPEX del sistema y el retorno de inversión:

$$TIR = \frac{CAPEX}{Costos\ operacionales}$$

CAPITULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Análisis de la composición de muestras de agua subterránea.

Los resultados del análisis de estas muestras y su comparación respecto a la normativa colombiana a través de la Resolución 2115 de 2007 se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis de la composición física y química de las muestras

MUESTRA	UNIDADES	POZO #1	POZO #2	POZO #3	Resolución 2115 de 2007
pH		7.34	7.59	6.8	9
DO OXIGENO DISUELTO	%	77.8	34.6	63.8	-
DO	mg/L	7.36	3.84	6.53	10
CONDUCTIVIDAD	μS/cm	2786	7138	1655	1000
TDS	ppm	1397	3569	328	300
SALINIDAD	PSU	1.46	3.95	0.82	-
TURBIDEZ	FNU	2	4.9	3	2
COLOR	PCU	7.53	32.23	0.66	15
SEDIMENTOS	mg/L	0	0	0.001	
ALCALINIDAD	mg/L	100	103	85	200
CLORUROS	mg/L	852.4	1705	493.48	250
DUREZA TOTAL	mg/L	14.2	0.86	0.4	300
FOSFATOS	mg/L	9.02	0.7	2.22	0,5
HIERRO	mg/L	0	0	0	0,3
SULFATOS	mg/L	8.49	-	0.02	250
NITRATOS	mg/L	8.2	34.2	39	10
NITRITOS	mg/L	0.863	9	0	0,1

Los resultados de las muestras presentan un agua salobre y con altos contenidos en nitritos y fosfatos. Para el tratamiento de este tipo de agua es necesario un proceso de desalinización. Además, se realizaron pruebas de coliformes a muestras de agua de estos pozos para evaluar el nivel bacteriano presente. Los resultados de los conteos obtenidos se presentan a continuación :

Muestra #1

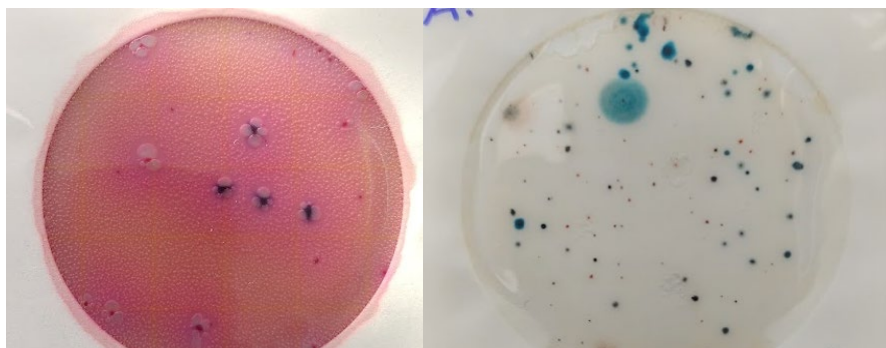


Figura 22. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 1. a. Coliformes totales b. Bacterias aerobias

Recuento de E. coli colonias azules con gases = 4

Coliformes = 22

Muestra #2 :Diluida 1-5

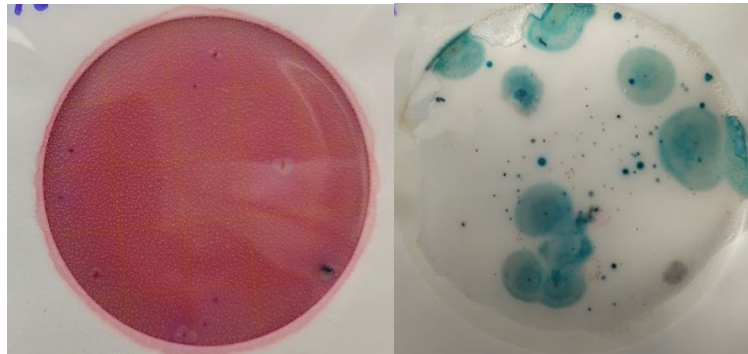


Figura 23. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 2 a. Coliformes totales b. Bacterias aerobias

Recuento de E. coli colonias azules con gases = 1

Coliformes = 10

Muestra #3

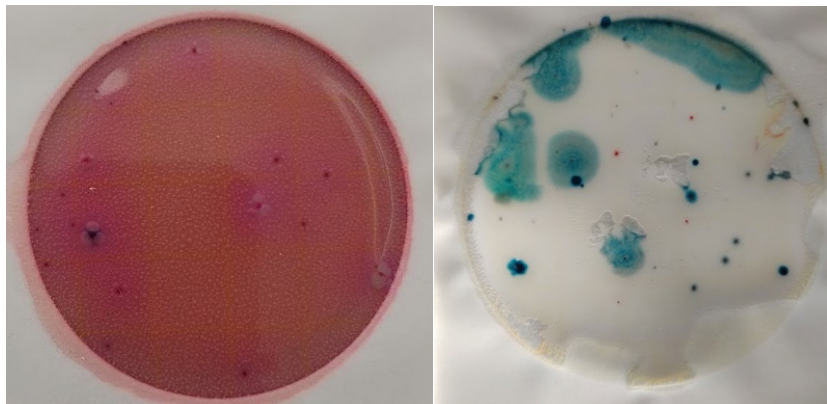


Figura 24. Resultados de las placas de Petrifilm de la muestra 1. coliformes totales y bacterias aerobias de la muestra 3.

Recuento de E. coli colonias azules con gases = 1

Coliformes = 18

Los resultados de las placas Petrifilm confirman la presencia de bacterias y microorganismos, para contrarrestarlos se considera en el diseño un esterilizador ultravioleta de al menos 36 GPM fabricado con una carcasa de acero inoxidable 304 y con una longitud de onda de 254 nm y que trabaje a baja presión de 125 psi. Con una dosis de 30 MJ/cm² que se utilice antes de las membranas para evitar la formación de bio-fouling o ensuciamiento por la formación de microorganismos.

4.2. Definición de especificaciones

Tabla 7. Especificaciones iniciales de diseño

Especificaciones				
Concepto	Propone	R/D	Descripción	Valor deseable
Función	C	R	Tratamiento de agua potable a partir de fuentes salinas de agua (desalinización de agua) para 1300 personas garantizando 140L/día/persona.	7.5 m ³ /h
		R	Tratamiento de agua para riego	3 m ³ /h
		R	Desinfección del agua	Coliformes totales: 0UFC/100 cm ³ E. coli totales: 0 UFC/100 cm ³
		R	Almacenamiento de agua	1200 m ³
Dimensión	I	MR	Dimensión que facilite el transporte	1,8 m x 3,95 m
Peso	I	MR	Dimensión que facilite el transporte	600 kg
Materiales	I	MR	Resistentes al desgaste del ambiente corrosivo	-
	I	R	Resistencia a las cargas de las presiones sin exceder los límites de fluencia	Resistente a 1000 psi de presión
Seguridad	I	R	Cumplir estándares de dotación de agua potable	Resol.2115
Vida útil	I	D	Vida útil rentable	3 años
Fuente de energía	I	D	Autosuficiente	-
Mantenimiento	C	D	Facilidad en ensamblaje	-
	I		Espacio disponible para mantenimiento de equipos	-
Señales	I	R	Medición de presión	<1000 psi
	I	D	Medición de temperatura	<100 °C
	I	R	Medición de conductividad	<1000 µS/cm
Propone: C=Cliente I=Ingeniería				
R/D: R=requerimiento; MR= Modificable Requerimiento; D=deseo				

4.3. Análisis de especificaciones

Tabla 8. Matriz 2X2.

Matriz 2X2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Suma	Peso relativo
1	Tamaño	■	4	3	2	2	3	2	1	2	3	2	3	3	4	34	7,47
2	Peso	1	■	0	0	2	2	0	1	2	2	0	2	2	2	16	3,52
3	Materiales inoxidables	2	5	■	3	2	2	2	3	2	3	1	4	3	1	33	7,25
4	Costo	3	5	2	■	3	3	2	3	3	3	2	2	3	3	37	8,13
5	Autosuficiente/Consumo de Energía	3	3	3	2	■	3	2	3	3	3	2	3	4	4	38	8,35
6	Seguridad	2	3	3	2	2	■	2	2	3	3	2	3	4	3	34	7,47
7	Remoción de iones	3	5	3	3	3	3	■	4	3	3	1	3	3	3	40	8,79
8	Modularidad	4	4	2	2	2	3	1	■	3	3	1	2	3	3	33	7,25
9	Durabilidad	3	3	3	2	2	2	2	2	■	3	1	2	3	4	32	7,03
10	Facilidad en Mantenimiento	2	3	2	2	2	2	2	2	2	■	1	2	4	2	28	6,15
11	Tratamiento de agua	3	5	4	3	3	3	4	4	4	4	■	2	2	3	44	9,67
12	Resistencia	2	3	1	3	2	2	2	3	3	3	3	■	3	3	33	7,25
13	Operabilidad	2	3	2	2	1	1	2	2	2	1	3	2	■	2	25	5,49
14	Instrumentación	1	3	4	2	1	2	2	2	1	3	2	2	3	■	28	6,15

Como resultados se obtiene que las especificaciones con mayor peso relativo son:

- Modularidad
- Flujo de agua tratada producida
- Costo
- Autosuficiencia

4.4. Matriz QFD

Tabla 9. QFD

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	D demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Column #												
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)					▼	▼	▲	▼	▼	▼	▲	X	▲	▲	▼	▼	▲
Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")					DIMENSION [m2]	MASA TOTAL [kg]	VIDA UTIL SISTEMA [años]	CONSUMO DE ENERGIA [kW/m2]	SALINIDAD AGUA PRODUCIDA [UPS]	NUMERO DE COMPONENTES [#]	FLUJO DE AGUA POTABLE PRODUCIDA [m3/die]	CANTIDAD DE SEÑALES [#]	RESISTENCIA DE LOS MATERIALES [MPa]	DENSIDAD ENERGETICA PRODUCIDA [kW/m2]	CAPEX (\$/m3)	OPEX (\$/m3)	ALMACENAMIENTO DE AGUA PRODUCIDA [m3]
1	9	3,7	3,7	TAMAÑO	⊖	⊖	▲			⊖	⊖	⊖		⊖	⊖		⊖
2	9	2,6	2,6	PESO	⊖	⊖		▲			⊖		▲	▲			⊖
3	9	6,6	6,6	MATERIALES INOXIDABLES			⊖				▲		⊖		⊖	⊖	⊖
4	9	7,9	7,9	COSTO DE FABRICACION	⊖	⊖					⊖		⊖	⊖	⊖	⊖	⊖
5	9	8,8	8,8	AUTOSUFICIENTE				⊖	⊖	▲	▲			⊖		⊖	
6	9	9,0	9,0	SEGURIDAD						▲		⊖	⊖	▲	▲	▲	▲
7	9	8,8	8,8	REMOCION DE IONES					⊖		⊖			▲		⊖	⊖
8	9	7,3	7,3	MODULARIDAD	⊖	⊖		⊖	⊖	⊖	⊖	▲		▲	⊖	▲	▲
9	9	7,7	7,7	DURABILIDAD			⊖					▲	⊖	▲			
10	9	6,4	6,4	FACILIDAD DE MANTENIMIENTO			▲			⊖				▲		⊖	⊖
11	9	10,1	10,1	PRODUCCION DE AGUA					⊖		⊖			⊖			⊖
12	9	8,6	8,6	RESISTENCIA			⊖				⊖		⊖		⊖	⊖	⊖
13	9	5,7	5,7	OPERABILIDAD				⊖		⊖	⊖	⊖		⊖		⊖	▲
14	9	6,8	6,8	INSTRUMENTACION		▲		⊖		⊖	⊖	⊖		⊖	⊖	⊖	⊖
Target or Limit Value					6	600	3	1,46			5	6					5
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)																	
Max Relationship Value in Column					9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance					193,9	153,2	164,4	218,9	218,3	189,2	442,7	165,9	360,6	395,2	263,5	400,6	457,2
Relative Weight					5,4	4,2	4,5	6,0	6,0	5,2	12,2	4,6	10,0	10,9	7,3	11,1	12,6

4.5. Análisis funcional

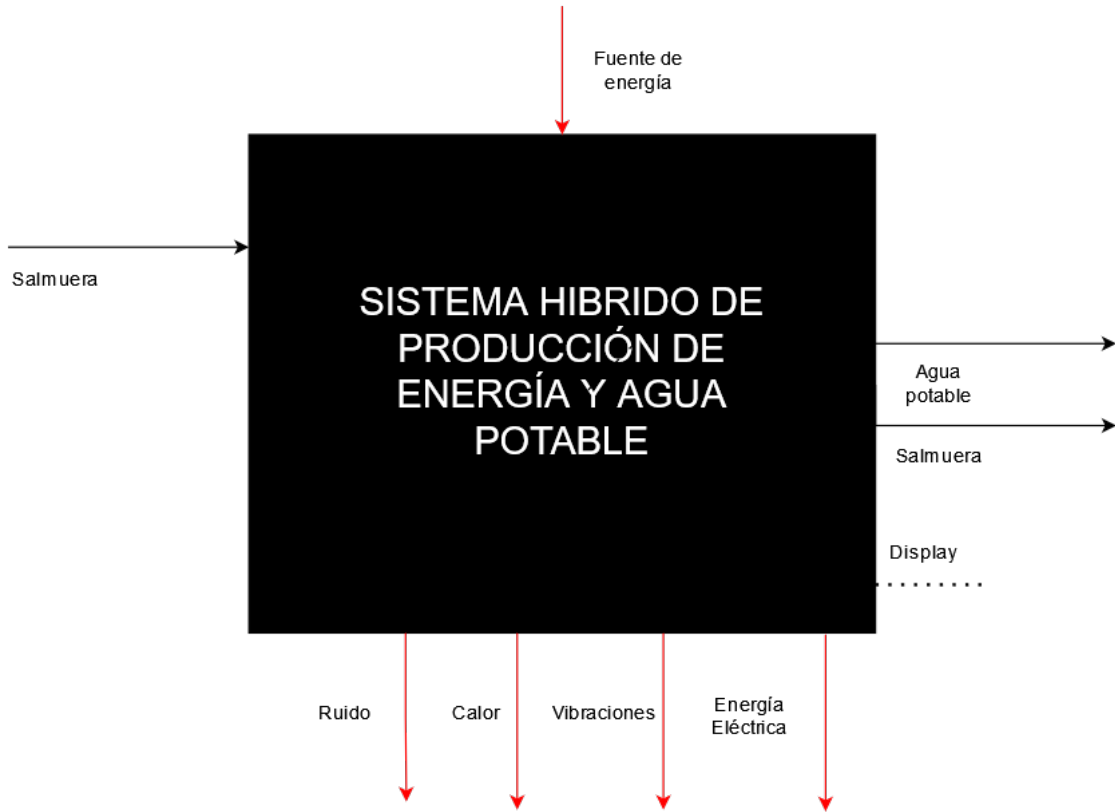


Figura 25. Caja negra

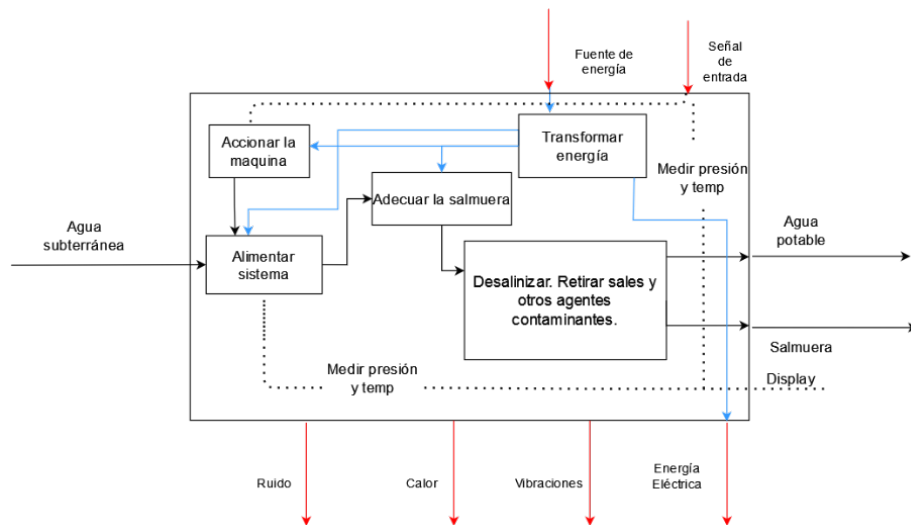


Figura 26. Caja transparente

4.6. Generación de alternativas

4.6.1. Opción de acoplamiento #1.

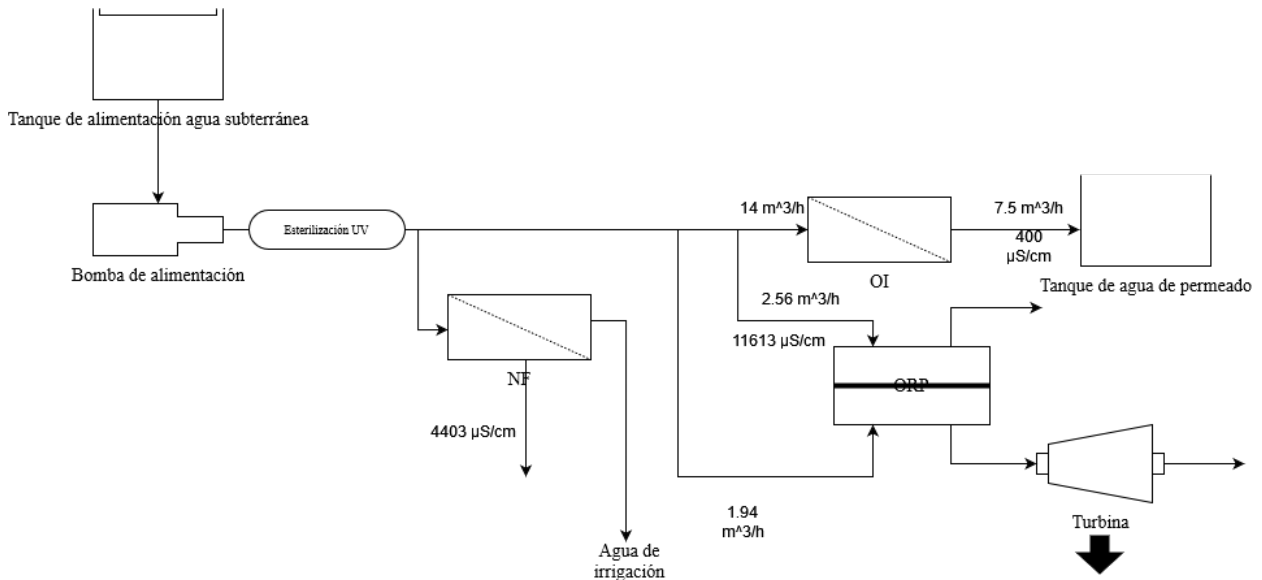


Figura 27. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 1

En la implementación de este sistema se utiliza una primera etapa de nanofiltración como tratamiento para la producción de agua de irrigación donde se desaliniza el agua subterránea y se almacenada en un tanque de alimentación. El resto del flujo del agua almacenada se presuriza con una bomba de desplazamiento positivo e ingresa a la celda de osmosis inversa.

En este punto el flujo de agua que tiene contacto en la celda con una membrana de OI de baja energía (llamada así por las bajas presiones que soporta en comparación con una membrana que desaliniza agua de mar) y pasa como flujo de permeado que atraviesa la membrana. Éste se almacena en un tanque dejando un flujo con una mayor concentración de sales que no atraviesa la membrana. La caída de presión en la celda es en promedio de 1.92 psi por cada elemento de membrana. Por lo que el flujo saliente remanente con una concentración de minerales mayor a la del tanque de alimentación se dirige a la celda del sistema de ORP donde tiene contacto con la membrana de Osmosis directa (FO) con cierta presión hidráulica menor a la diferencia de presión osmótica entre las corrientes. La presión osmótica provoca el tránsito espontáneo a través de la membrana para diluir el flujo de concentrado. Por lo tanto, la presión hidráulica del permeado aumenta para igualar el del flujo de mayor concentración de sales. Esta presurización del sistema de ORP se puede aprovechar para producir energía con una turbina. La ventaja de esta configuración es que se puede retirar el módulo del sistema de irrigación en caso de que se requiera. Además, de aprovechar al máximo el gradiente salino disponible, ya que las corrientes en el sistema ORP son el concentrado y el agua subterránea. Otra ventaja es que no se necesita otra fuente de agua. En cuanto a las desventajas, se debe tener presente el poco gradiente salino que alimenta el sistema y se evalúa en la sección 4.8 su viabilidad.

4.6.2. Opción de acoplamiento #2.

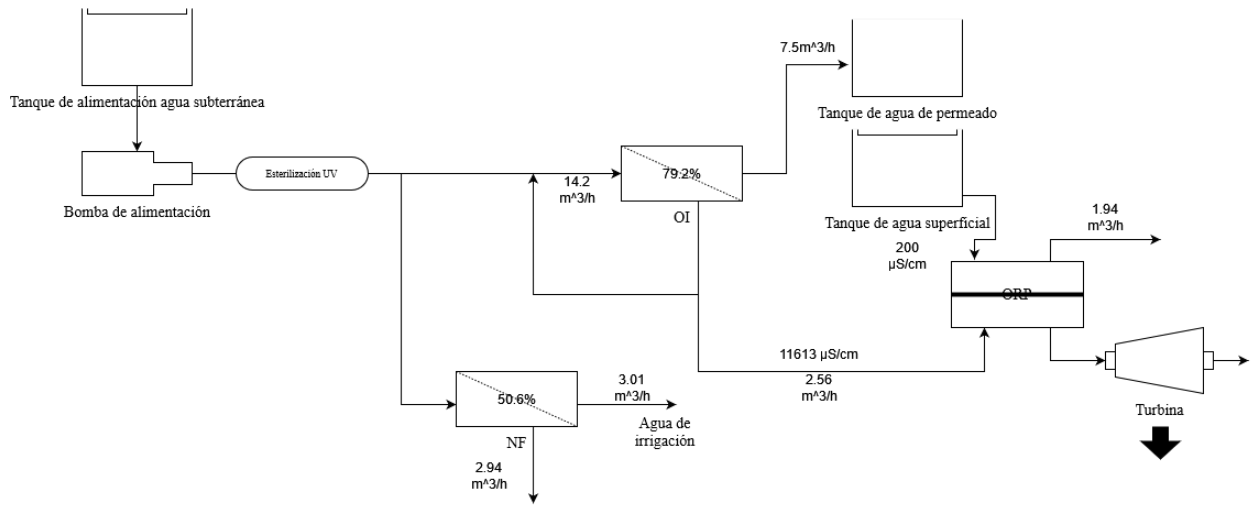


Figura 28. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 2

Esta opción es parecida a la alternativa #1 con el cambio de la alimentación en el sistema de ORP por agua superficial, además de que el proceso de nanofiltración es un módulo aparte del proceso, que puede ser añadido o retirado según la necesidad. La ventaja de esta alternativa sobre las otras es el incremento del gradiente salino, por lo que se tiene una mayor densidad de potencia. La limitante en esta opción es que se necesita contar con una fuente de agua superficial para alimentar al sistema de generación de energía. El sistema de desalinización puede almacenar la salmuera producida y ser transportada a una fuente de agua superficial para ser utilizada en la producción de energía con el sistema ORP.

4.6.3. Opción de acoplamiento #3.

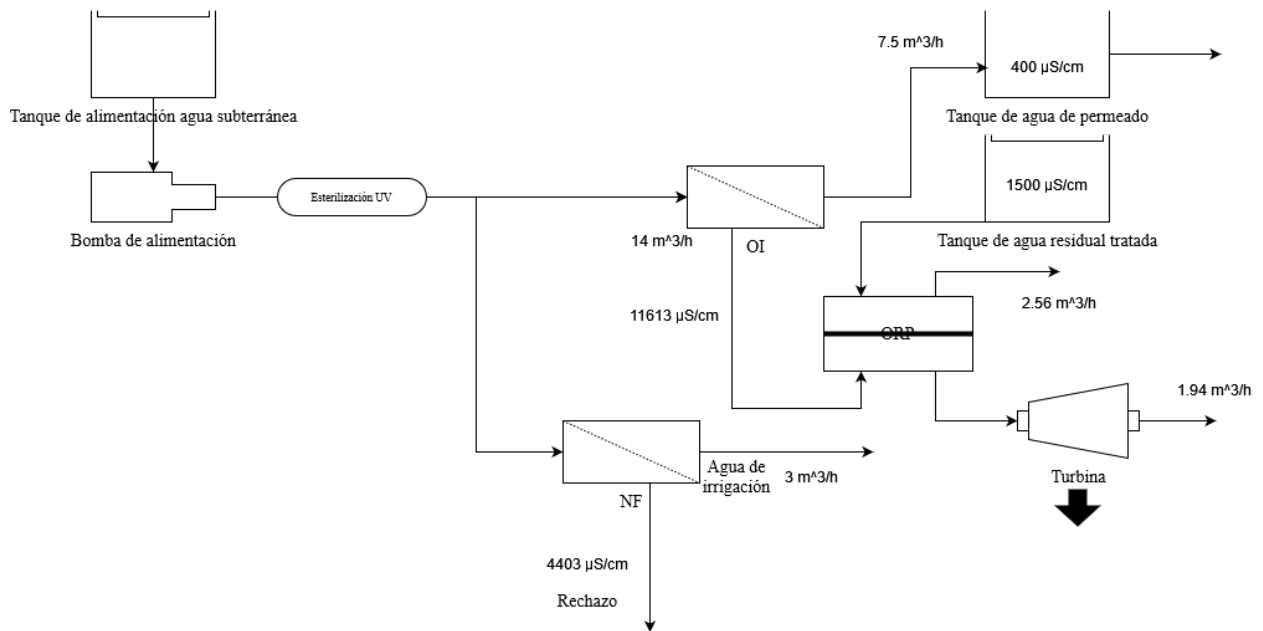


Figura 29. Configuración de sistema OI y EGS (ORP). Alternativa 3

Esta opción es parecida a la alternativa 2 pero cambia en la alimentación en el sistema de ORP por el efluente de una planta de tratamiento de agua residual. Las ventajas de esta configuración es que no necesita de otra fuente de agua superficial, además de tener un mayor gradiente salino que la alternativa #1.

4.6.5. Opción de acoplamiento #5

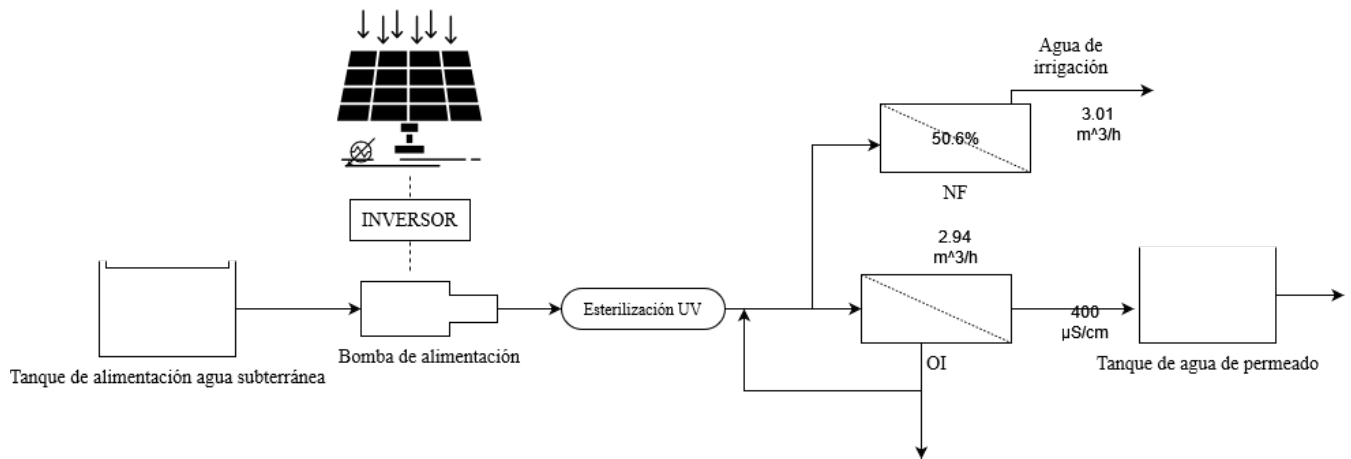


Figura 31. Configuración de sistema OI- PV. Alternativa 5

La última alternativa propuesta es un módulo de nanofiltración para obtener el agua de irrigación y un módulo de ósmosis inversa con una membrana de baja energía para obtener agua desalinizada. La producción de energía en esta alternativa se realiza a través de paneles solares y un inversor de corriente directa (DC) a corriente alterna (AC).

4.7 Evaluación de alternativas

A continuación, se presenta el dimensionamiento de cada sistema en términos de modularidad, flujo de permeado producido, consumo y densidad energética:

4.7.1. Modularidad del sistema

En este caso, para la parametrización del diseño se tuvo en cuenta la configuración con una membrana AK8040F de un área de superficie de 365 ft². Y un rango típico de operación de 10-20 GFD (15-35 Lmh), que posee las siguientes medidas:

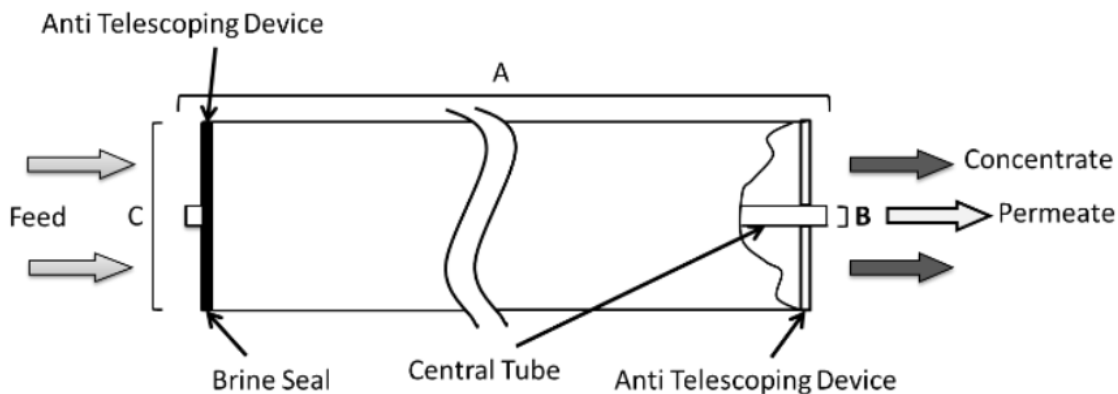


Figura 32. Esquema de la membrana AK.

Tabla 10. Dimensiones de la membrana de baja presión AK8040F [58].

MODELO	A[cm]	B[cm]	C[cm]	PESO[kg]
AK8040F	101.6	2.86	20.1	16

La parametrización de las diferentes configuraciones posibles a usar se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 11. Posibles configuraciones que cumplen con el flujo de permeado requerido.

Jw	Elementos/housings	Housings	Fp [gal/día]	Costo mínimo aprox. [USD]	Min. recovery [%]	Max recovery [%]
12	3	3	52560	17800	49%	78%
12	6	2	52560	21000	49%	78%
12	7	2	61320	23600	57%	81%
13	3	3	56940	17800	53%	80%
13	6	2	56940	21000	53%	80%
13	7	1	33215	13800	31%	70%
13	7	2	66430	23600	62%	82%
14	3	3	49275	17800	46%	77%
14	3	4	65700	22400	61%	82%
14	6	2	61320	21000	57%	81%
14	7	1	35770	13800	33%	71%
14	7	2	71540	23600	66%	83%
15	3	3	49275	17800	46%	77%
15	3	4	65700	22400	61%	82%
15	6	1	32850	12500	30%	70%
15	6	2	65700	21000	61%	82%
15	7	1	38325	13800	35%	73%
15	7	2	76650	23600	71%	84%
16	3	3	52560	17800	49%	78%
16	3	4	70080	22400	65%	83%
16	6	1	35040	12500	32%	71%
16	6	2	70080	21000	65%	83%
16	7	1	40880	13800	38%	74%
16	7	2	81760	23600	76%	85%
17	3	3	55845	17800	52%	80%
17	3	4	74460	22400	69%	84%
17	6	2	74460	21000	69%	84%
17	7	2	86870	23600	80%	86%
18	3	3	59130	17800	55%	80%
18	3	4	78840	22400	73%	85%
18	6	2	78840	21000	73%	85%
18	7	2	91980	23600	85%	86%

También se debe tener en cuenta que entre mayor sea la cantidad de elementos en los contendores, supondrá un aumento en la caída de presión en el sistema y una disminución el flujo de permeado. Por el contrario, una reducción del número de contenedores o elementos de membrana conlleva a un decremento del área activa y una disminución del flujo de permeado. En este caso específico para cumplir con los 7.5 m³/h (47551 gal/día) de flujo de agua de permeado producida se puede utilizar un arreglo 2:1:1 con 3 elementos de membrana por contendores de presión ya que cumple con el flujo de permeado necesario, no es costoso en comparación con las otras configuraciones, se puede configurar para tener hasta tres pasos por las membranas y asegurar una mayor calidad de agua, y de ser necesario un incremento en la población puede cubrir las necesidades o requerimientos.

4.7.2. Cálculo de agua flujo de permeado para irrigación

Teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en la metodología la membrana de NF seleccionada para producir el flujo de permeado mínimo requerido (3 m³/h) para tener en cuenta es una DK con un área activa de 364 ft² (33.8 m²) y un flujo de permeado de 30.7 m³/día. Un contenedor de presión con 4 elementos de membrana es ideal para esta aplicación.

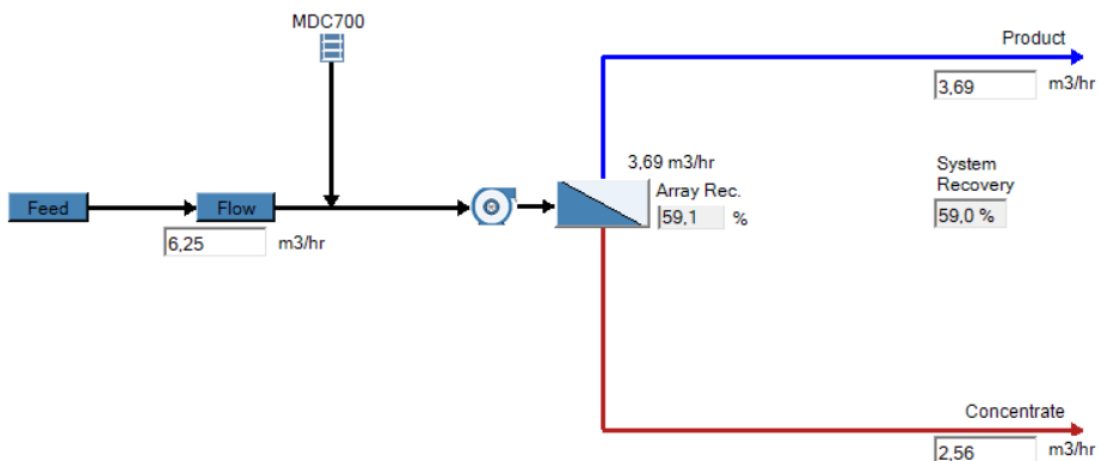


Figura 33. Configuración con membrana de NF simulada en WINFLOW.

Pump Specification ×

Feed

Flow Rate m3/hr

Discharge Pressure psi

Inlet Pressure psi

Power 1.0 kW

Energy Consumption 0.27 KWh/m3
(per unit permeate flow)

Auto Efficiencies

Pump Efficiency %

Motor Efficiency %

VFD Efficiency %

Además, se realizó una validación experimental a 25 °C, 60 Hz obteniendo un flux promedio de 18 Lmh y una conductividad entre 699-806 $\mu\text{S}/\text{cm}$ concentración de cloruros de 528 mg/L con una membrana DK de nanofiltración. También se corroboró el mismo procedimiento para verificar la viabilidad de una membrana de ultrafiltración sin obtener disminución en la conductividad eléctrica del permeado por lo tanto no se recomienda su uso.

4.7.3. Cálculo del flujo de agua de permeado producida

Alternativa #1, #2, #3,#5

Con un arreglo 2:1:1, 3 elementos por membrana y una recuperación (recovery) del 76% se obtiene de WINFLOW 4.4 que el permeado en las membranas será el siguiente:

Tabla 12. Resultados de los TDS y flujos de la simulación en WINFLOW

Flujos	m ³ /h	Datos analíticos	mg/L	Datos analíticos	$\mu\text{S}/\text{cm}$
Alimentación:	9.62	TDS Alimentación	1450.01	Conductividad Alimentación	2694
Permeado:	7.50	TDS Permeado	161.59	Conductividad Permeado	354
Concentrado:	2.11	TDS Concentrado	6013.06	Conductividad concentrado	11613

4.7.3.1. Validación experimental del flujo de permeado OI Medición de variables fisicoquímicas en OI y ORP.

Los resultados son los siguientes de la curva de calibración de la conductividad eléctrica vs las partes por millón de las sales en el agua se presentan a continuación:

Tabla 13. Datos obtenidos al realizar la curva de calibración del conductímetro.

Volumen de Agua ml	Volumen de Agua m3	Masa de Agua en g	Sal g	Moles Suelto	Molaridad mol/m ³	Conductividad mS/cm
50	5.00E-05	61.05	2	0.034	684.35	59.74
30	3.00E-05	36.63	1.58	0.027	901.06	82.08
50	5.00E-05	61.05	1.57	0.027	537.21	50.52
70	7.00E-05	85.47	1.57	0.027	383.72	34.52
100	1.00E-04	122.1	2	0.034	342.17	31.7
31	3.10E-05	37.851	0.2	0.003	110.38	10.05
40	4.00E-05	48.84	0.2	0.003	85.54	7.93

Los resultados obtenidos se grafican en la siguiente curva de ppm vs conductividad:

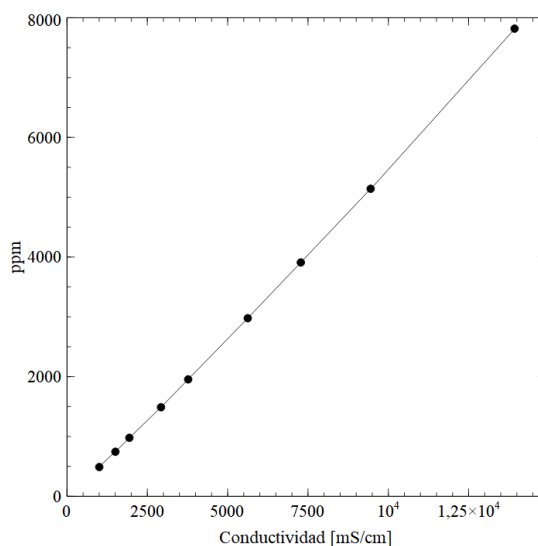


Figura 34. Curva de la concentración de soluto TDS [ppm] vs conductividad eléctrica [μ S/cm]

Los resultados muestran la relación lineal que tiene la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales en partes por millón, por lo que en este trabajo se usara la conductividad como una medida directa de los TDS. A través de la ecuación :

$$TDS = 0.5652 * \text{Conductividad eléctrica}$$

Resultados experimentales pruebas en banco de pruebas en configuración OI

Tabla 14. Resultados de flujo de permeado en experimento 2^4

Orden	10	11	9	16	15	14	13	12	6	5	1	7	3	4	2	8
(ml)	(s)															
1	31.35	107.76	31.2	75	52.55	145.79	47.45	122.16	23.82	39.77	19.33	33.52	31.49	64.88	26.88	56.41
1	28.12	108.35	30.45	97.21	50.95	151.02	46.33	119.51	18.92	42.15	19.63	35.36	28.49	67.09	26.36	53.32
1	28.93	103.98	32.23	92.4	52.31	151.49	49.18	121.08	19.33	36.53	17.93	34.67	29.15	69.55	25.47	54.01
1	27.68	107.15	29.63	92.31	50.93	158.56	47.38	124.57	21.45	38.41	19.09	33.47	31.5	63.35	26.49	55.43
1	28.18	104.71	31.12	93.78	52.59	152.85	47.28	113.75	17.39	42.4	19.23	36.3	28.89	37.28	26.61	54.62
1	28.1	90.52	30.19	96.43	51.66	130.09	49.41	127.17	25.23	39.9	18.7	34.68	29.68	60.32	26.44	54.32
1	33.51	100.46	30.58	77.74	52.19	146.04	46.46	121.64	15.37	41.36	18.73	35	29.5	32.01	26.12	57.99
1	25.81	91.5	30.84	98.7	51.21	136.94	48.25	122.39	21.47	40.38	18.8	34.78	31.86	68.08	25.29	54.42
1	30.51	98.61	31.25	89.03	51.57	136.6	47.53	119.65	17.98	44.18	18.63	34.81	28.29	56.96	26.99	54.72
1	31.55	98.94	30.54	89.74	53.45	144.13	47.83	124.55	23.42	43.57	18.67	35.19	30.76	63.71	27.79	56.67
media (s)	29.374	101.198	30.803	90.234	51.941	145.351	47.71	121.647	20.438	40.865	18.874	34.778	29.961	58.323	26.444	55.191
media (min)	0.490	1.687	0.513	1.504	0.866	2.423	0.795	2.027	0.341	0.681	0.315	0.580	0.499	0.972	0.441	0.920
flujo (ml/min)	2.043	0.593	1.948	0.665	1.155	0.413	1.258	0.493	2.936	1.468	3.179	1.725	2.003	1.029	2.269	1.087
flux (Lmh)	29.18	8.47	27.827	9.499	16.502	5.897	17.966	7.046	41.939	20.975	45.414	24.646	28.609	14.696	32.414	15.53

Los resultados de la configuración en OI del banco pruebas presentada en la se muestran en la Tabla 14 los cambios de los pesos por gramos de los tiempos de cada configuración se ponderan y se calcula el flujo de permeado. Además, se muestran las condiciones de entrada de las variables controlables del proceso que en este contexto son la presión, la frecuencia, la temperatura y concentración.

Tabla 15. Resultados de conductividad del permeado en experimento 2⁴

Orden	10	11	9	16	15	14	13	12	6	5	1	7	3	4	2	8
Concentración alimentación (μS/cm)	7150	7078	6953	7046	7008	6990	7220	7100	3160	3076	3300	3049	3352	3033	3068	2980
frecuencia (Hz)	60	60	20	20	60	60	20	20	60	60	20	20	60	60	20	20
presión (psi)	120	50	120	50	120	50	120	50	120	50	120	50	120	50	120	50
Temperatura (°C)	40.8	40	39.4	40.5	25	25	25	25	41.2	39.9	40	40	24.5	24.9	24.3	26
Conductividad del permeado (μS/cm)	716.8	808	532	1123	956	1260	884.1	814	169.2	232.8	200	353	200	176.6	167.8	270

Los resultados de presentados en la tabla 8 de análisis de varianza muestran la significancia de las variables controlables para la variable el cambio de la variable de respuesta y la interacción de la presión y la temperatura.

Tabla 16. Significancia de los factores en OI.

Factor	Coeficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
A: Presión	0.234622	0.0178255	13.1622	6.8439E-09
C: Temperatura	0.55218	0.05912336	9.3395	3.9522E-07
D: Conductividad	-0.0032363	0.00030983	-10.4454	1.0827E-07

Los valores P por debajo de la significancia de 0.05 muestran que existen una influencia en el factor controlable sobre la variable de respuesta estudiada en este caso, el flujo de permeado del agua con una confianza del 95% se puede asegurar que, de los 4 factores: presión, frecuencia, temperatura, conductividad, y sus interacciones; los significativos son presión, temperatura y conductividad eléctrica e influyen en la permeabilidad del agua. Los resultados revelan las variables que maximizan el flujo de permeado de agua que deben ser considerados para la modelación de OI.

$$Flux = 0.234522 * P + 055218 * T - 0.0032363 * C \quad (24)$$

La ecuación modela el flux a través de la membrana AK utilizada en el banco de prueba. Es decir, con ella se puede calcular el flujo de permeado por metro cuadrado de membrana que se obtiene a partir de los factores de presión, temperatura, conductividad y frecuencia de la bomba. Por ejemplo, con los siguientes factores de entrada:

Tabla 17. Factores usados en el experimento 2⁴

Presión	50	psi	100	psi
Temperatura	25	°C	40	°C
Concentración	3000	μS/cm	7000	μS/cm
Frecuencia	20	Hz	60	Hz
Flux	15.64	Lmh	31.55	Lmh

Se obtiene un flux de 15.64 Lmh que se encuentra en el rango empleado (15-35 Lmh) para el cálculo de los números de módulos.

4.8. Densidad energética producida por alternativa

4.8.1. Parámetros de membrana en configuración OI-ORP.

Para el cálculo del parámetro A de la membrana de ósmosis directa CTA utilizada en ORP se realiza la siguiente configuración de las variables controlables:

Tabla 18. Condiciones de operación para el cálculo de A.

FLUJO DE FEED	1,8	GPM
TEMPERATURA	20	°C
FRECUENCIA DE BOMBA	60	Hz
AGUA DESTILADA	0	ppm

Al compactar la membrana a la presión nominal se mide el flujo de permeado y luego se procede a medir el flujo de permeado en 4 diferentes presiones menores a la presión nominal. Por último, se grafica las presiones hidráulicas del proceso vs el flujo de permeado y la pendiente sería el parámetro A. Los resultados experimentales obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 19. Tiempo de cambio de 1 g de agua en 4 diferentes presiones y flujos de permeados obtenidos.

Media (s)	Media (min)	Flujo (ml/min)	PRESION(bar)	Flux (Lmh)
251.080	4.185	0.239	5.517	3.414
240.270	4.005	0.250	5.517	3.567
304.380	5.073	0.197	4.828	2.816
306.430	5.107	0.196	4.828	2.797
307.720	5.129	0.195	4.828	2.785
334.000	5.567	0.180	4.138	2.566
331.840	5.531	0.181	4.138	2.583
358.500	5.975	0.167	4.138	2.391
355.710	5.929	0.169	4.138	2.410
317.680	5.295	0.189	4.138	2.698
444.370	7.406	0.135	3.448	1.929
431.790	7.197	0.139	3.448	1.985
434.840	7.247	0.138	3.448	1.660

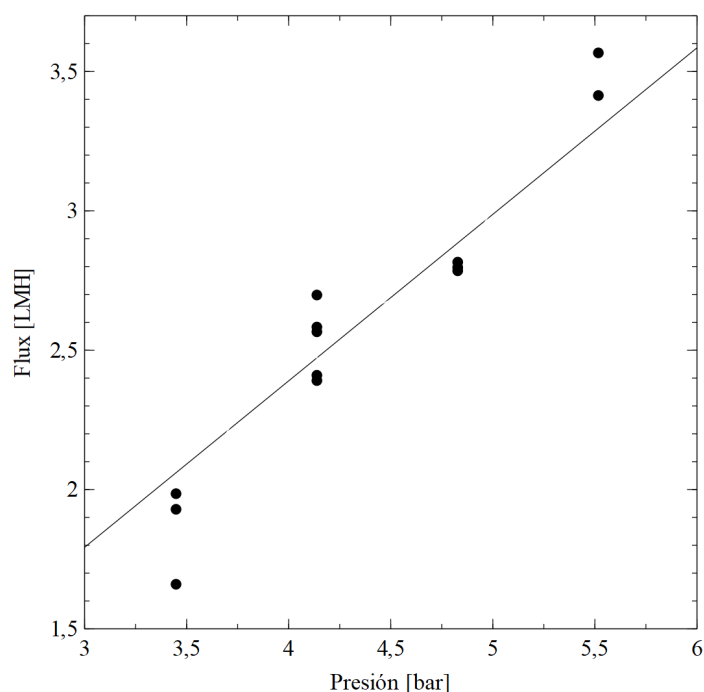


Figura 35. Flujo de permeado vs presión

Para el cálculo de B se utilizó el método presentado en la Figura 19 en una de membrana celulosa triacetato fabricada por FTS H2O en las siguientes condiciones:

Tabla 20. Condiciones de operación para el cálculo experimental de B.

Conductividad solución de alimentación	2048	$\mu\text{S/cm}$
Conductividad solución permeado	594.2	$\mu\text{S/cm}$
Coefficiente de transferencia de masa (k)	1.202E-05	m/s
Presión	120	'psi

Los flujos obtenidos se utilizan para calcular B con la ecuación 17:

Tabla 21. Datos de flux obtenido para el cálculo de B.

Media (s)	390.0100	376.5400	373.8700	405.0100	337.9300	356.1800	358.7100	359.1300	398.7100	368.3400	427.5900
Flujo (ml/min)	0.1538	0.1593	0.1605	0.1481	0.1776	0.1685	0.1673	0.1671	0.1505	0.1629	0.1403
Flux (Lmh)	2.1977	2.2764	2.2926	2.1163	2.5365	2.4065	2.3895	2.3867	2.1498	2.3270	2.0046
B (Lmh)	0.8538	0.8827	0.8887	0.8237	0.9777	0.9304	0.9242	0.9232	0.8361	0.9013	0.7822

Los valores obtenidos se promedian para un valor de B de 0.884 Lmh.

En cuanto al cálculo del parámetro S su cálculo se realiza de manera numérica utilizando la Ecuación 9. Los parámetros usados para su cálculo y el resultado obtenido se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 22. Parámetros usados para el cálculo numérico de S.

D	1.50E-09	m ² /s
B	8.84E-01	m/s
A	1.66E-12	m/s Pa
S	3.97E-04	m
Presión osmótica	7.05E5	Pa

4.8.2. Densidad de potencia (W) y modularidad del sistema ORP

Siguiendo el procedimiento descrito anteriormente se realiza el cálculo de la densidad de potencia de tres membranas diferentes cuyas propiedades son descritas en la siguiente:

Tabla 23. Parámetros A, B, y S de diferentes membranas

Membrana	A [Lmh /bar]	A [m ³ /m ² s Pa]	B [Lmh]	B [m/s]	S [μm]
CTA FTSH2O	0,6	1,66667E-12	0,88	2,4611E-07	397
HTI CTA	0,97	2,69444E-12	1,16	3,2222E-07	326
PA (APTMS/TMC)	2.06	5.722E-12	0.298	8.277E-8	560

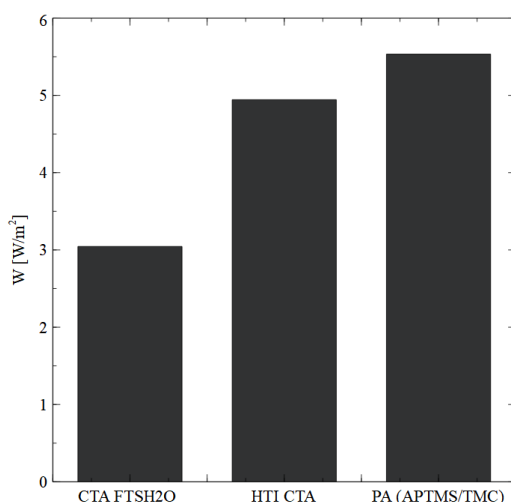


Figura 36. Densidad de potencia de diferentes membranas.

El parámetro de permeabilidad A es el factor más importante de la membrana y que más influye en la densidad de potencia y número de módulos necesarios para cada alternativa.

Alternativa #1:

Con una conductividad de 11613 μS/cm y de 1300 μS/cm en la corriente de equilibrio y de alimentación, respectivamente. Y un consumo de aproximadamente 3.9 kW para producir los 7.5 m³/h de agua potable y 3 m³/h de agua de irrigación. Esta alternativa necesitaría 53 contenedores de presión y 371 elementos de membrana de 40 m² para producir cada uno 3.4W. El resumen de estos valores calculados se resume en la siguiente tabla:

Conductividad equilibrio (draw)	11613	μS/cm
Conductividad alimentación (feed)	800	μS/cm

Energía producida por elemento	8,84	W
Elementos de membrana	371	ud
Contenedores de presión	53	ud
Área requerida	14.92	m ²

Alternativa #2:

Conductividad equilibrio (draw)	11613	μS/cm
Conductividad alimentación (feed)	600	μS/cm
Energía producida por elemento	10,97	W
Elementos de membrana	259	ud
Contenedores de presión	37	ud
Área requerida	9.87	m ²

Alternativa #3:

Conductividad equilibrio (draw)	11613	μS/cm
Conductividad alimentación (feed)	1500	μS/cm
Energía producida por elemento	8,5	W
Elementos de membrana	336	ud
Contenedores de presión	48	ud
Área requerida	14.22	m ²

Alternativa #4

Conductividad equilibrio (draw)	11613	μS/cm
Conductividad alimentación (feed)	3000	μS/cm
Energía producida por elemento	5,3992	W
Elementos de membrana	523	ud
Contenedores de presión	75	ud
Área requerida	22.38	m ²

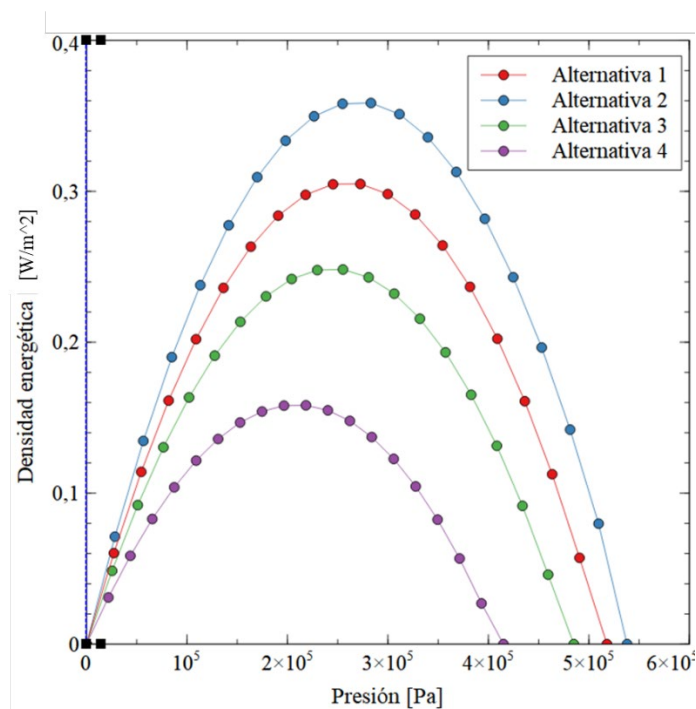


Figura 37. Densidad energética de las alternativas 1,2, 3 y 4.

Como se observa en la figura 37, las bajas densidades energéticas entre 0.16-0.35 W/m² muy por debajo de lo recomendado por la Statkraft (5 W/m²) para garantizar la viabilidad de la generación de energía a partir de EGS, hace inviable la aplicación de las alternativas mencionadas para su comercial.

Alternativa #5

Para el cálculo de los paneles solares se tuvo en cuenta unos paneles solares plegables BLUETTI SP350 con una potencia máxima de 350W, cada módulo de este equipo posee 4 paneles que se pueden plegar entre sí. Ya que los paneles solares no son capaces de producir su potencia máxima en cualquier condición debido a condiciones climatológicas, de inclinación, orientación y las horas de radiación solar media diaria[74]; se debe realizar el cálculo del número de módulos a partir de la cantidad más pequeña de radiación solar media diaria recibida en un mes.

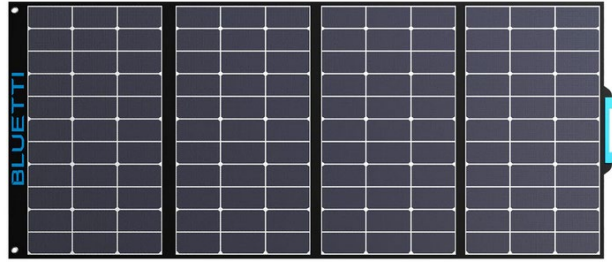


Figura 38. Paneles solares BLUETTI SP350

Para el cálculo de la cantidad de paneles solares es necesario el saber la cantidad de horas solar pico (HSP), la cual es una unidad encargada de medir la irradiación solar y se define como el tiempo de una hipotética irradiancia solar constante de 1.000 W/m²[74]. La estación más cercana a los puntos donde se realizó el muestreo de las aguas de subterráneas se encuentra en Manatí los datos tomados a 2015 por el INVIMA de esta estación meteorológica son los siguientes:

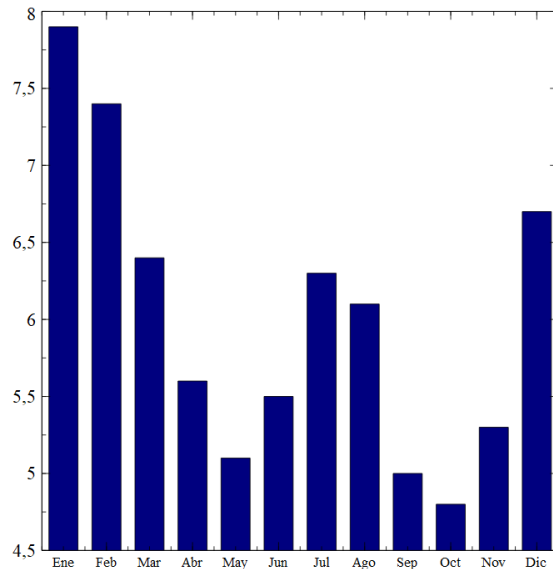


Figura 39. HSP mensual de la estación Normal Manatí en el Atlántico[75]

Tomando en cuenta el valor de HSP en el mes de octubre y la eficiencia de los paneles monocristalinos BLUETTI igual a 23% el número de paneles solares sería igual a:

$$\# \text{ de paneles solares} = \frac{\text{Consumo diario}}{P_{\text{max}} * \text{HSP} * \eta_{\text{panel}}} \quad (25)$$

Siendo el consumo diario 23184Wh/día es necesario el uso de 60 módulos que se pueden conectar en serie y que posee cada uno 4 paneles para un total de 240 paneles. Y un área total de 129.6m² disponibles para la granja solar. También el inversor debe tener un factor de seguridad de 1,5 por lo que un Growatt MID 25KTL3-X de 37500W es ideal para cubrir el suministro de energía en el sistema.

4.9. Consumo energético de la OI

Desde WINFLOW se puede realizar el cálculo de la densidad energética producida a partir del consumo de la bomba principal que alimenta el sistema. En el caso de las alternativas #1, #2, #3 y #5 es el siguiente:

Tabla 24. Consumo de la bomba en OI calculado por WINFLOW

Flujo de alimentación	m ³ /h	14,00
Presión de descarga	psi	89,7
Eficiencia total	%	82,88
Consumo	kW	2,89

El consumo por metro cubico de agua desalinizada, calculado por WINFLOW es de 0.38kWh/m³

4.9.1. Consumo energético de la OI calculado de forma experimental

Para el cálculo de forma experimental en el banco de pruebas que se encuentra en la Universidad del Norte presentado en la Figura 10. Se utiliza un analizador de redes Fluke 435. En este caso , el equipo se conectó al banco de pruebas y se midió el consumo eléctrico en intervalos de tiempos iguales mientras se configuró la bomba de desplazamiento positivo a diferentes presiones. Los resultados se presentan en la siguiente gráfica:

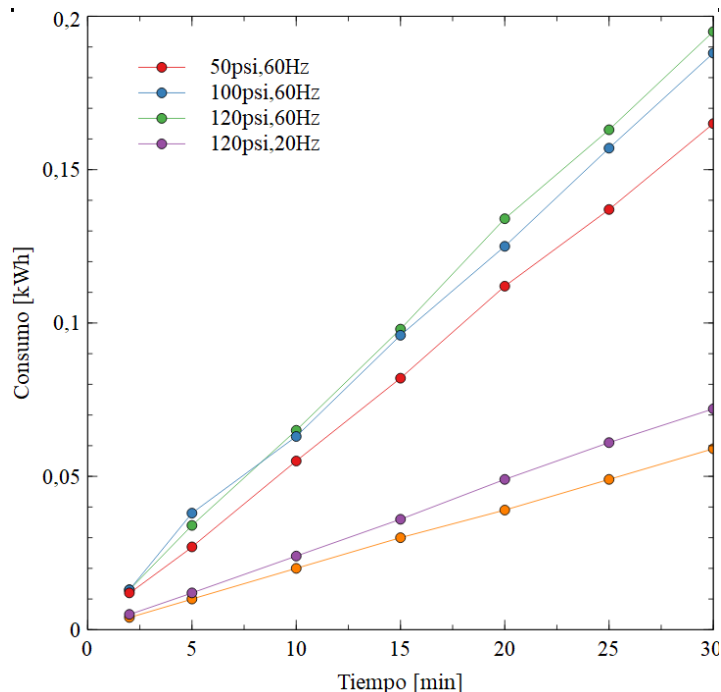


Figura 40. Consumo de la bomba de desplazamiento positivo

La figura representa el consumo de la bomba de desplazamiento positivo empleada para presurizar la membrana a diferentes presiones y frecuencia. Utilizando la gráfica podemos

calcular el consumo de la bomba a bajas presiones empleando la ecuación 22 del flux. En el caso del consumo en las alternativas, si se quiere desalinizar una fuente de agua subterránea con una conductividad de aproximadamente 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 100psi, 30°C y 60 Hz; se tiene un flux de 31.55 Lmh con una membrana AK . Y se calcula un consumo de 0.35 kWh/m³ lo que representa una diferencia del 7,89% con respecto al calculado por WINFLOW.

4.10. Costos

4.10.1. Costos alternativas #1

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	105	\$ 1.400	\$ 147.000
Housing	4	\$ 500	\$ 2.000
AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
Filtro OI.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Housing ORP	53	\$ 500	\$ 26.500
ORP membrana fibra hueca	371	\$ 400	\$ 148.400
TOTAL			\$ 341.680

4.10.2. Costos alternativas #2

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	105	\$ 1.400	\$ 147.000
Housing	4	\$ 500	\$ 2.000
AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
PRETRATAMIENTO OI.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Housing ORP	33	\$ 500	\$ 16.500
ORP membrana fibra hueca	231	\$ 400	\$ 92.400
TOTAL			\$ 135.680

4.10.3. Costos alternativas #3

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	5	\$ 1.400	\$ 7.000
Housing	4	\$ 500	\$ 2.000
AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
Filtro OI.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Housing ORP	48	\$ 500	\$ 24.000
ORP membrana fibra hueca	336	\$ 400	\$ 134.400
TOTAL			\$ 185.180

4.10.4. Costos alternativas #4

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	5	\$ 1.400	\$ 7.000
Housing	4	\$ 500	\$ 2.000

AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
Filtro OI.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Housing ORP	72	\$ 500	\$ 36.000
ORP membrana fibra hueca	525	\$ 400	\$ 210.000
TOTAL			\$ 272.780

4.10.5. Costos alternativas #5

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	5	\$ 1.400	\$ 7.000
Housing	4	\$ 500	\$ 2.000
AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
Filtro OI.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Inversor	1	\$ 1.250	\$ 1.250
Panel BLUETTI PV350	60	\$ 800	\$ 48.000
TOTAL			\$ 76.030

4.11. Matriz de decisión: Análisis Jerárquico (AHP)

En la siguiente figura se presentan los resultados expuestos por ExpertChoice. A pesar de necesitar un área de 129.6m^2 , hasta un 82% mayor que las otras, y disponer de un remanente con mayor conductividad eléctrica en comparación con los sistemas de gradiente salino que diluyen este subproducto, la alternativa seleccionada es la Alternativa #5 conformada por la Ósmosis inversa con paneles solares. Ya que tiene costos 1.7 veces menores, en comparación con las alternativas que usan sistema ORP y requiere solamente 60 módulos para desalinizar la misma cantidad de flujo de permeado.

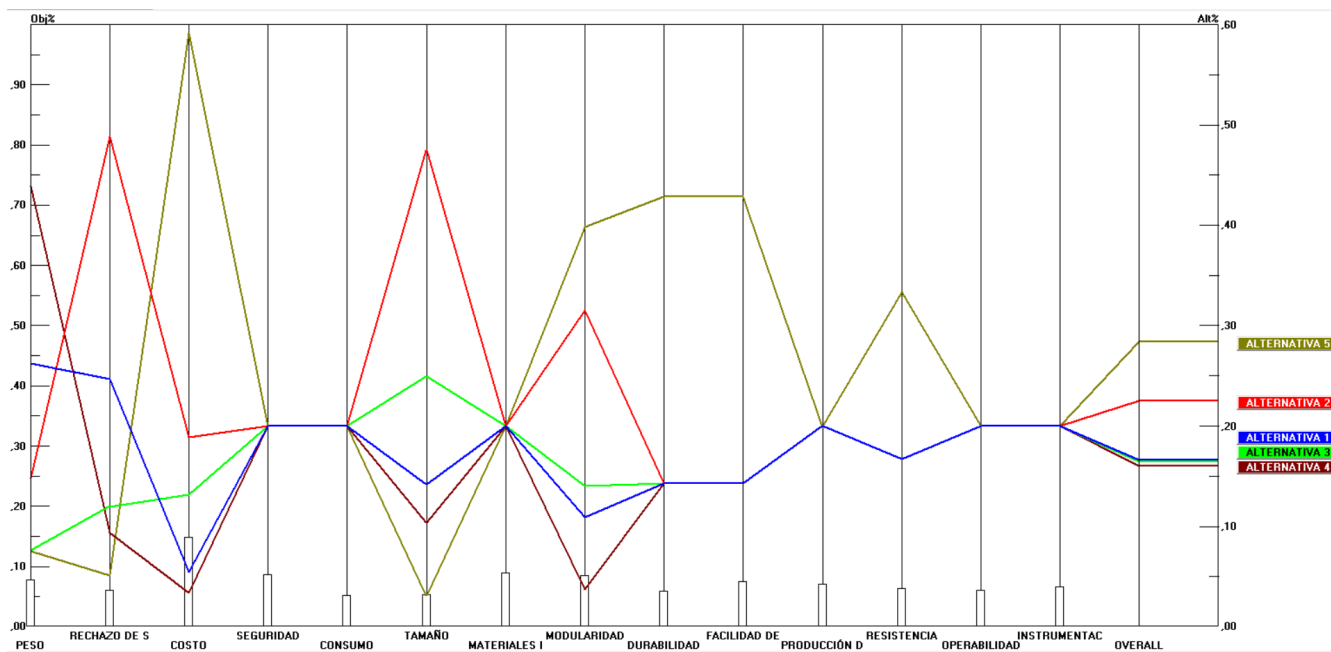


Figura 41. Matriz de rendimiento de las alternativas según los criterios estipulados en el análisis de especificaciones en Expert Choice..

Luego de seleccionar la alternativa se procede a realizar un esquema del diseño conceptual del sistema a través de un renderizado en SolidWorks:



Figura 42. Visualización del diseño conceptual.

4.12. Cálculo del retorno de la inversión

Para el cálculo del retorno de la inversión, primero se deben realizar los costos operaciones del diseño conceptual si estuviera conectado a una red eléctrica convencional, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 25. Costos operacionales de OI y NF si estuvieran conectados a una red eléctrica

RO	Dosificación (kg/h)	Costo (USD/kg)	Horas de trabajo	Costo anual
MDC700 Antiescalante	0.04	\$ 6.00	8760	\$ 2,102.40
	Consumo de energía (kWh/m3)	Costo (USD/kWh)		
Bomba	0.38	\$ 0.21	8760	\$ 699.05
NF	Dosificación (kg/h)	Costo (USD/kg)	Horas de trabajo	
MDC700 Antiescalante	0.04	\$ 6.00	8760	\$ 2,102.40
	Consumo de energía (kWh/m3)	Costo (USD/kWh)		
Bomba	0.27	\$ 0.21	8760	\$ 496.69
TOTAL				\$ 5,400.54

A partir de esto, se realiza los cálculos de retorno de inversión teniendo en cuenta el punto de operación de la bomba presurizando 20 m³/h de agua a 100 m de cabeza de bomba. En la Figura 43 se presenta este punto de operación para una bomba IMP BL 20-80.

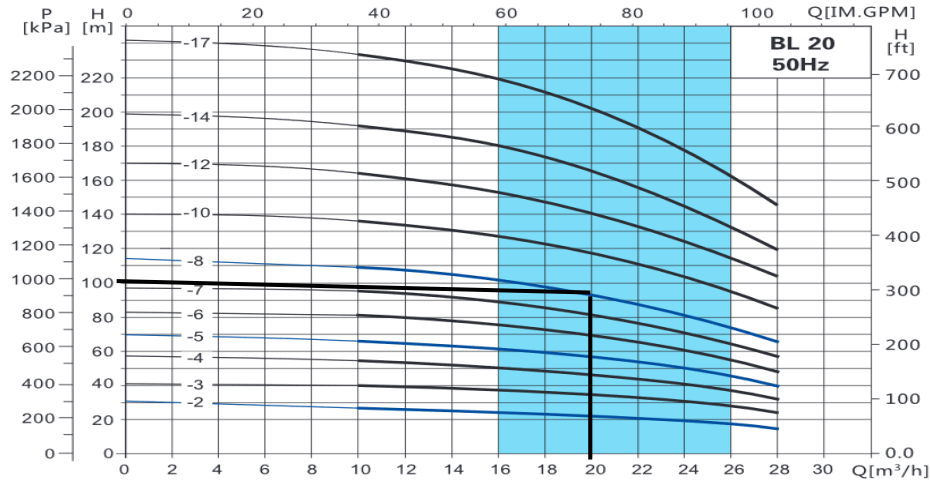


Figura 43. Punto de operación de bomba seleccionada IMP BL 20-80.

Mediante este punto de operación se recalcula cuantos deben ser los paneles solares:

NOMBRE	# ELEMENTOS	COSTO	SUBTOTAL
HL8040-400	4	\$ 1.400	\$ 5.600
Housing	5	\$ 500	\$ 2.500
AK8040F	12	\$ 1.300	\$ 15.600
PRETRATAMIENTO RO.Zs 01-40-FSE	3	\$ 60	\$ 180
Bomba	1	\$ 2.000	\$ 2.000
Inversor	1	\$ 1.250	\$ 1.250
Panel DOKIO 300W	170	\$ 200	\$ 34.000
TOTAL			\$ 61.130

Por lo tanto, el retorno de inversión es de 29.4 años, utilizando paneles DOKIO 300W también de módulos plegables, pero menos costosos que los BLUETTI. Por lo general, los retornos de inversión no deben exceder los 10 años, lo cual hace de este sistema técnicamente viable pero inviable económicamente y nada atractivo para una inversión. Pero se debe tener en cuenta que aun si es alta la inversión inicial en este proyecto y poco el retorno invertido, es más importante subsanar las necesidades de una región que está siendo vulnerable, y que requiere mayor inversión por parte del estado.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En este trabajo se realizó el diseño conceptual de un sistema descentralizado y autosuficiente comparando diferentes tecnologías de producción de energía renovables como lo son: la energía de gradiente salino y la fotovoltaica mediante la metodología DFMA. Para esto se logró el análisis de la composición de las aguas subterráneas en, al menos tres puntos en el departamento del Atlántico; donde se puede observar una calidad de baja salinidad (entre 3000- 7000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), en comparación con el agua de mar (55000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), con altas concentraciones de cloruros y nitratos por encima de la normativa colombiana 2115 de 2007 de agua potable.

Las alternativas que se generaron cumplen los requerimientos establecidos para el tratamiento del agua salobre mediante de tecnologías evaluadas experimentalmente como la Ósmosis inversa para el caso que se requiera agua potable y a través de la nanofiltración para el caso que se requiera agua de irrigación. Las alternativas se evaluaron teniendo en cuenta requisitos previamente establecidos y jerarquizados donde los más importantes fueron: la modularidad, flujo de agua tratada, tamaño, costo y el rechazo de sales y se selecciona la más adecuada a través de una matriz AHP. Con el empleo del sistema propuesto se puede producir el mínimo de agua potable para 3000 personas y el agua de riego para la adecuada irrigación de una hectárea de un cultivo de yuca con lo cual se puede esperar el incremento de hasta un 60% en la producción.

Con el cálculo de la densidad energética de cada alternativa de gradiente salino para que el sistema sea autosuficiente se puede identificar que los números de elementos y contenedores de presión necesarios para las alternativas 1, 2, 3 y 4 son altos debido al bajo gradiente salino presente en el sistema, además de la falta de membranas en el mercado con mejores parámetros de operación, lo que incrementa el costo inicial de estos sistemas. A pesar de que las membranas TFC tienen mayor difusión de agua y menor difusión de soluto en la parte activa de la membrana en comparación con las membranas CTA son ineficaces en términos de costos/beneficios en comparación con sistemas fotovoltaicos en las localidades estudiadas en este documento.

Las diferentes configuraciones de OI-ORP en términos de modularidad y densidad energía producida con valores entre 0,16-0,31 W/m^2 en sistemas de baja salinidad identificadas en este trabajo deben ser aplicadas a otras localidades con diferente gradiente salino como lo es la desembocadura del río Magdalena con un inmenso potencial tan grande como 1.89 MW/m^3 [76]. La aplicación de esta tecnología en esta zona puede ser la solución a la mala calidad del suministro de energía en la región dependiente de energías fósiles. En cuanto, a la tecnología más adecuada identificada para proveer la energía necesaria para la desalinización en los municipios del Centro del Atlántico es la fotovoltaica cuya únicas desventajas son las gran cantidad de área de área necesaria para la producción de energía de hasta 130 m^2 , además de que tiene mayor producción de salmuera con altas concentraciones de sales como desecho y un retorno de inversión alto (29.4 años) que requiere de mayor presencia del estado para ser financiado, ya que es técnicamente viable pero inviable económicamente. Se recomienda como trabajo futuro el realizar una caracterización más significativa de las aguas subterráneas de estas localidades, así como el de realizar el diseño básico y a detalle del diseño conceptual obtenido para lograr emplear el sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gobernación del Atlántico, “Llevaremos a Polonuevo agua potable 24 horas, los 7 días de la semana”: Elsa Noguera,” 2022.
- [2] Gobernación del Atlántico, “‘La Ruta del Agua’ reanudó operación en 60 comunidades del Atlántico,” 2022. [Online]. Available: <https://www.atlantico.gov.co/index.php/noticias/prensa-agua-potable/16459-la-ruta-del-agua-reanudo>.
- [3] Semana, “Atlántico: Embalse del Guájaro ha perdido más de 4 mil hectáreas y casi todas sus rondas naturales,” 2012.
- [4] M. Aguilera Díaz, “El Canal del Dique y su subregion,” p. 87, 2006.
- [5] IDEAM, “Oferta y Uso de agua subterránea en Colombia,” 2010.
- [6] Karen Tatiana Pardo, “Colombia tiene 14 millones de hectáreas degradadas por salinización,” *EL Tiempo*, 2018.
- [7] G. Fipps, “Standards and Salinity Management and Salinity Management Water Analysis :,” *Agrilife Ext.*, vol. 4, no. 3, pp. 1–17, 1995.
- [8] Guy Sela, “La Calidad del Agua de Riego,” 2021. .
- [9] IDEAM, “Reporte de avance del estudio Nacional del agua 2018,” 2018. Accessed: Dec. 16, 2019. [Online]. Available: <https://www.bluradio.com/medio-ambiente/casi-800000-personas-mueren-al-ano-en-el-mundo-por-falta-de-acceso-agua-potable-209129-ie435>.
- [10] A. R. Hoffman, “Water, Energy, and Environment - A Primer.pdf.” .
- [11] A. Estado, D. E. L. Arte, J. Rodolfo, and Q. Quintero, “Ordenamiento territorial en el Departamento del Atlántico: estado del arte,” *ACE Archit. City Environ.*, 2008, doi: 10.5821/ace.v3i7.2448.
- [12] 2016 Gobernación del Atlántico, 2016 FundaciónPromigas, and 2016 Fundesarrollo, *Sur del atlántico*. 2016.
- [13] M. Schiffler, “Perspectives and challenges for desalination in the 21st century, 2,” *Desalination*, vol. 165, pp. 1–9, 2004, doi: 10.1016/s0011-9164(04)00207-3.
- [14] K. Park, J. Kim, D. R. Yang, and S. Hong, “Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions,” *J. Memb. Sci.*, no. September, p. 117607, 2019, doi: 10.1016/j.memsci.2019.117607.
- [15] E. J. Okampo and N. Nwulu, “Optimisation of renewable energy powered reverse

- osmosis desalination systems: A state-of-the-art review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 140, no. December 2020, p. 110712, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110712.
- [16] A. S. Stillwell and M. E. Webber, “Predicting the specific energy consumption of reverse osmosis desalination,” *Water (Switzerland)*, vol. 8, no. 12, pp. 1–18, 2016, doi: 10.3390/w8120601.
- [17] J. L. Prante, J. A. Ruskowitz, A. E. Childress, and A. Achilli, “RO-PRO desalination: An integrated low-energy approach to seawater desalination,” *Appl. Energy*, vol. 120, pp. 104–114, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.01.013.
- [18] F. E. Ahmed, R. Hashaikheh, and N. Hilal, “Hybrid technologies: The future of energy efficient desalination – A review,” *Desalination*, vol. 495, no. July, p. 114659, 2020, doi: 10.1016/j.desal.2020.114659.
- [19] M. Chen *et al.*, “An internal-integrated RED/ED system for energy-saving seawater desalination: A model study,” *Energy*, vol. 170, pp. 139–148, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2018.12.111.
- [20] Y. Liu and J. Wang, “Energy-saving ‘NF/EDR’ integrated membrane process for seawater desalination. Part II. The optimization of ED process,” *Desalination*, vol. 422, no. July, pp. 142–152, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.07.010.
- [21] A. K. Plappally and J. H. Lienhard V, “Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 4818–4848, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.022.
- [22] K. Wang, A. A. Abdalla, M. A. Khaleel, N. Hilal, and M. K. Khraisheh, “Mechanical properties of water desalination and wastewater treatment membranes,” *Desalination*, vol. 401, pp. 190–205, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2016.06.032.
- [23] J. Feher, “Osmosis and Osmotic Pressure,” *Quant. Hum. Physiol.*, pp. 182–198, 2017, doi: 10.1016/b978-0-12-800883-6.00017-3.
- [24] O. Alvarez-Silva, A. Y. Maturana, C. A. Pacheco-Bustos, and A. F. Osorio, “Effects of water pretreatment on the extractable salinity gradient energy at river mouths: the case of Magdalena River, Caribbean Sea,” *J. Ocean Eng. Mar. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 227–240, 2019, doi: 10.1007/s40722-019-00141-y.
- [25] A. M. Shubham Lanjewar and L. M. R. and A. Roy, “Blue Energy and Its Potential: The Membrane Based Energy Harvesting,” *IntechOpen*, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>.
- [26] S. H. Chae, J. Seo, J. Kim, Y. M. Kim, and J. H. Kim, “A simulation study with a new performance index for pressure-retarded osmosis processes hybridized with seawater reverse osmosis and membrane distillation,” *Desalination*, vol. 444, no. January, pp. 118–128, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2018.07.019.

- [27] S. A. Avlonitis, “Operational water cost and productivity improvements for small-size RO desalination plants,” *Desalination*, vol. 142, no. 3, pp. 295–304, 2002, doi: 10.1016/S0011-9164(02)00210-2.
- [28] M. T. Mito, X. Ma, H. Albuflasa, and P. A. Davies, “Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. January, pp. 669–685, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.008.
- [29] V. G. Gude, “Energy consumption and recovery in reverse osmosis,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 36, no. 1–3, pp. 239–260, 2011, doi: 10.5004/dwt.2011.2534.
- [30] S. Senthil and S. Senthilmurugan, “Reverse Osmosis-Pressure Retarded Osmosis hybrid system: Modelling, simulation and optimization,” *Desalination*, vol. 389, pp. 78–97, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.01.027.
- [31] CEPAL, “Segundo informe anual sobre el progreso y los desafíos regionales de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL,” *Banco Interam. Desarro.*, p. 184, 2018.
- [32] A. M. Helal, S. A. Al-Malek, and E. S. Al-Katheeri, “Economic feasibility of alternative designs of a PV-RO desalination unit for remote areas in the United Arab Emirates,” *Desalination*, vol. 221, no. 1–3, pp. 1–16, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.064.
- [33] H. Ettouney and M. Wilf, “Conventional Thermal Process,” *Seawater Desalin. Conv. Renew. Energy Process.*, p. 306, 2009, doi: 10.1007/978-3-642-01150-4.
- [34] J. M. Ortiz, E. Expósito, F. Gallud, V. García-García, V. Montiel, and A. Aldaz, “Electrodialysis of brackish water powered by photovoltaic energy without batteries: direct connection behaviour,” *Desalination*, vol. 208, no. 1–3, pp. 89–100, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2006.05.026.
- [35] H. C. Duong *et al.*, “Treatment of RO brine from CSG produced water by spiral-wound air gap membrane distillation - A pilot study,” *Desalination*, vol. 366, pp. 121–129, 2015, doi: 10.1016/j.desal.2014.10.026.
- [36] M. Freire-Gormaly and A. M. Bilton, “Experimental quantification of the effect of intermittent operation on membrane performance of solar powered reverse osmosis desalination systems,” *Desalination*, vol. 435, no. June, pp. 188–197, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.09.013.
- [37] M. Freire-Gormaly and A. M. Bilton, “Design of photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems considering membrane fouling caused by intermittent operation,” *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 108–121, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.11.065.
- [38] L. García-Rodríguez, “Renewable energy applications in desalination: State of the

- art,” *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 381–393, 2003, doi: 10.1016/j.solener.2003.08.005.
- [39] Q. Ma and H. Lu, “Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art,” *Desalination*, vol. 277, no. 1–3, pp. 274–280, 2011, doi: 10.1016/j.desal.2011.04.041.
- [40] R. G. Raluy, L. Serra, and J. Uche, “Life cycle assessment of desalination technologies integrated with renewable energies,” *Desalination*, vol. 183, no. 1–3, pp. 81–93, 2005, doi: 10.1016/j.desal.2005.04.023.
- [41] C. Charcosset, “A review of membrane processes and renewable energies for desalination,” *DES*, vol. 245, pp. 214–231, 2009, doi: 10.1016/j.desal.200.
- [42] R. McBride and W. Hanbury, “WIND POWER A RELIABLE SOURCE FOR DESALINATION,” Else&r Science Publishers B.V, 1987.
- [43] M. S. Miranda and D. Infield, “A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries.”
- [44] I. de la Nuez Pestana, F. J. G. Latorre, C. A. Espinoza, and A. G. Gotor, “Optimization of RO desalination systems powered by renewable energies. Part I: Wind energy,” *Desalination*, vol. 160, no. 3, pp. 293–299, 2004, doi: 10.1016/S0011-9164(04)90031-8.
- [45] D. Zejli, R. Benchrifa, A. Bennouna, and K. Zazi, “Economic analysis of wind-powered desalination in the south of Morocco,” *Desalination*, vol. 165, no. SUPPL., pp. 219–230, 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.06.025.
- [46] M. A. Abdelkareem, M. El Haj Assad, E. T. Sayed, and B. Soudan, “Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants,” *Desalination*, vol. 435, no. November 2017, pp. 97–113, 2018, doi: 10.1016/j.desal.2017.11.018.
- [47] A. Ali, R. A. Tufa, F. Macedonio, E. Curcio, and E. Drioli, “Membrane technology in renewable-energy-driven desalination,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81. Elsevier Ltd, pp. 1–21, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.047.
- [48] L. Garcia-Rodriguez, “DESALINATION ELSEVIER Seawater desalination driven by renewable energies: a review,” 2002.
- [49] T. Witte, S. Siegfriedsen, and M. El-Allawy, “WindDeSalter® Technology: Direct use of wind energy for seawater desalination by vapour compression or reverse osmosis,” *Desalination*, vol. 156, no. 1–3, pp. 275–279, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00358-8.
- [50] G. T. Gray, J. R. McCutcheon, and M. Elimelech, “Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation,” *Desalination*, vol. 197, no. 1–3,

pp. 1–8, 2006, doi: 10.1016/j.desal.2006.02.003.

- [51] M. Asimow, *Introduction to Design*. Prentice-Hall, 1962.
- [52] Maury; Riba, “Ingeniería Concurrente Una concepción transformadora.”
- [53] G. Dieter, *Engineering design*. Boston: McGraw-Hill International Editions, 2013.
- [54] IDEAM, “METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS,” 2022. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/metodos-analiticos>.
- [55] 3M, “Placas Petrifilm para el Recuento de Coliformes,” 2022. [Online]. Available: <https://multimedia.3m.com/mws/media/1409677O/guia-interpretacion-petrefilm-coliformes.pdf>.
- [56] “[Karl_Ulrich,_Steven_Eppinger]_Product_Design_and_(z-lib.org).pdf.” .
- [57] J. Coll and C. R. Romeva, “ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE ARQUITECTURAS,” pp. 244–257, 1991.
- [58] Suez, “AK series low energy brackish water RO elements,” 2020.
- [59] DANE, “Demografía y población,” 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion>.
- [60] M. de A. y D. Rural, “Estadísticas Agropecuarias,” 2022. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx>.
- [61] F. Pastrana, H. Alviz, and J. G. Salcedo, “Respuesta de dos cultivares de yuca (Manihot esculenta Crantz) (CM 3306–4 y MCOL 2215) a la aplicación de riego en condiciones hídricas diferentes,” Universidad de Sucre, 2014.
- [62] J. Salcedo Medoza and K. Contreras Lozano, *Agroindustria de productos amiláceos I*. 2017.
- [63] L. Wu and L. Dogde, “LANDSCAPE PLANT SALT TOLERANCE SELECTION GUIDE FOR RECYCLED WATER IRRIGATION,” 2005. [Online]. Available: <https://slosson.ucdavis.edu/files/215300.pdf>.
- [64] S. Miyamoto, I. Martinez, M. Padilla, and A. Portillo, “Landscape Plant Response to Salinity,” 2004. [Online]. Available: <https://agrilifecdn.tamu.edu/el Paso/files/2011/10/Photo-Guide-Landscape-Plant-2004.pdf>.
- [65] Sterlitech, “CF042D Flow Diagram,” 2021. <https://www.sterlitech.com/cf042-crossflow-cell-cf042.html>.
- [66] J. D. Cooper, “Solute Concentration Estimation by Electrical Conductivity,” *Soil Water Meas.*, pp. 292–300, 2016, doi: 10.1002/9781119106043.ch21.

- [67] S. Lim and H. K. Shon, "Chapter 4 - Characterization of Membranes for Membrane-Based Salinity-Gradient Processes," in *Membrane-Based Salinity Gradient Processes for Water Treatment and Power Generation*, S. Sarp and N. Hilal, Eds. Elsevier, 2018, pp. 125–154.
- [68] K. Touati, *Pressure Retarded*. .
- [69] F. Helfer, C. Lemckert, and Y. G. Anissimov, "Osmotic power with Pressure Retarded Osmosis: Theory, performance and trends – A review," *J. Memb. Sci.*, vol. 453, pp. 337–358, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.053>.
- [70] A. Achilli, T. Y. Cath, and A. E. Childress, "Power generation with pressure retarded osmosis: An experimental and theoretical investigation," *J. Memb. Sci.*, vol. 343, no. 1–2, pp. 42–52, 2009, doi: 10.1016/j.memsci.2009.07.006.
- [71] M. F. Naguib, J. Maisonneuve, C. B. Laflamme, and P. Pillay, "Modeling pressure-retarded osmotic power in commercial length membranes," *Renew. Energy*, vol. 76, no. November 2009, pp. 619–627, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.048.
- [72] B. Kim, G. Gwak, and S. Hong, "Review on methodology for determining forward osmosis (FO) membrane characteristics: Water permeability (A), solute permeability (B), and structural parameter (S)," *Desalination*, vol. 422, no. December 2015, pp. 5–16, 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.006.
- [73] G. AAS, A. MEA, S. HA, and A.-M. MSA, "Effect of Different Salts on Mass Transfer Coefficient and Inorganic Fouling of TFC Membranes," *J. Membr. Sci. Technol.*, vol. 07, no. 02, 2017, doi: 10.4172/2155-9589.1000175.
- [74] Energema S.A., "Departamento Renovables Hora Solar Pico (Hsp)," pp. 1–8, 2014, [Online]. Available: <https://www.grupoelektra.es/blog/wp-content/uploads/2014/10/como-somos-los-delektra-que-son-las-HSP.pdf>.
- [75] IDEAM, "Introducción al atlas interactivo," 2015. http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/6.Anexo_Promedios-mensuales-de-brillo-solar.pdf.
- [76] O. A. Alvarez-Silva, A. F. Osorio, and C. Winter, "Practical global salinity gradient energy potential," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1387–1395, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.03.021.

Apéndice A1: Código para el cálculo de la densidad energética en OCTAVE

```
clc; clear all;
```

```
# Pressure Retarded Osmosis #
```

```
# Input Data #
```

```
Temp=50+273.15
```

```
Conductivity_feed=600 #uS/cm
```

```
ppm_feed=(0.5652*Conductivity_feed) #mg/L
```

```
Conductivity_permeate=10200#35046 #uS/cm
```

```
ppm_permeate=(0.5652*Conductivity_permeate) #ppm #g/m3 #30000 para agua de mar
```

```
Draw_pressure=37990.11 #Pa #80 psi
```

```
Feed_pressure=47504.88 #Pa #100 psi
```

```
Delta_P=linspace(0,37.1693e+04,20)#1014100 para agua de mar#2000000#800000#  
30.1693e+04 para 7500feeddFeed_pressure-Draw_pressure
```

```
# MEMBRANE PARAMETER #
```

$$A=12E-12\#2E-12 \#m^3/m^2 \text{ s Pa}$$

$$B=0.6E-7$$

$$S=1000E-6$$

Constants

$$M=58.500 \#gr/mol$$

$$R_g=8.314472\#0.082 \#L \text{ atm/K mol} \quad \#8.314472Pa \text{ m}^3/mol \text{ K}$$

iv=2 #Constante de Van Hoff igual a 2 cuando es NaCl

CELL PROPERTIES

$$D_h=2*(0.09207*0.04572)/(0.09207+0.04572);$$

$$H_{cf}=0.2\#0.2/1000 \#0.0023 \#m$$

$$H_{cd}=0.1\#0.2/1000 \#0.0023 \#m$$

$$L_c=10/1000 \#0.0392 \#m$$

$$D=1.5E-9 \#m^2/s$$

Cross flow velocity

$$u_f = (1.6/60000)/(0.0023*0.0392)$$

$$u_d = (1.6/60000)/(0.0023*0.0392)$$

mass transfer coefficients

$$K_f = 1.62 * ((u_f * D^2) / (H_{cf} * L_c))^{1/3}$$

$$K_d = 1.62 * ((u_d * D^2) / (H_{cd} * L_c))^{1/3}$$

The film thickness

$$\text{film_thickness_feed} = D / K_f$$

$$\text{film_thickness_draw} = D / K_d$$

$$C_{Fb} = \text{ppm_feed}$$

$$C_{Db} = \text{ppm_permeate}$$

Calculo de deltas de concentración

$$\Delta C_b = C_{Db} - C_{Fb}$$


```
Delta_Cm_guess=Delta_Cb
```

```
tol=1E-8
```

```
tol1=1
```

```
i=0
```

```
j=0
```

```
for j=1:20
```

```
while(tol<tol1)
```

```
#for (i=20)
```

```
# OSMOTIC PRESSURE #
```

```
# Van Hoff Equation #
```

```
Delta_osmotic_pressure=(iv*Temp*Rg*Delta_Cm_guess/M)*101325 #Pa
```

```
# FLUX #
```

```
Jw=A*(Delta_osmotic_pressure-Delta_P)
```

$CF_s = ((CF_b + B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j)) * \exp(Jw(j) * \text{film_thickness_feed} / D)) - B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j);$

$CF_m = ((CF_b + B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j)) * \exp(Jw(j) * (\text{film_thickness_feed} + S) / D)) - B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j);$

$CD_m = ((CD_b + B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j)) * \exp(-Jw(j) * \text{film_thickness_draw} / D)) - B * \Delta_{Cm_guess} / Jw(j);$

$\Delta_{Cm} = CD_b * \exp(-Jw(j) * \text{film_thickness_draw} / D) - CF_b * \exp(Jw(j) * (\text{film_thickness_feed} + S) / D) / (1 - B / Jw(j) * \exp(-Jw(j) * \text{film_thickness_draw} / D) + B / Jw(j) * \exp(Jw(j) * (\text{film_thickness_feed} + S) / D));$

$\text{tol1} = \text{abs}(\Delta_{Cm_guess} - \Delta_{Cm}) / \Delta_{Cm};$

$\Delta_{Cm_guess} = \Delta_{Cm};$

$i = i + 1$

endwhile

POWER DENSITY

$W(j) = Jw(j) * \Delta_P(j)$

Cdraw outside

Draw_flow=(ud*(0.0023*0.0392)*60000) #L/min

Feed_flow=(uf*(0.0023*0.0392)*60000) #L/min

Cd_outside=((ppm_permeate*Draw_flow/1000)+ppm_feed*Feed_flow/1000)/(Draw_flow
+(Jw(j)*60000)) #g/L

endfor

plot(Delta_P,W)