



**ACREDITADA INSTITUCIONALMENTE
POR SU EXCELENCIA ACADEMICA**

**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA AUTOSOSTENIBLE
PARA EL SUR DEL ATLÁNTICO CON ENERGÍAS RENOVABLES**

Jonathan Javier Sánchez Guerrero

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
2022**

**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DESALINIZADORA AUTOSOSTENIBLE
PARA EL SUR DEL ATLÁNTICO CON ENERGÍAS RENOVABLES**

Jonathan Javier Sánchez Guerrero

**TRABAJO DE GRADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
Magister en Ingeniería Mecánica**

Director:

Ing. Antonio José Bula Silvera, Ph.D.

**Grupo de Investigación:
Uso Racional de la Energía y del Medio Ambiente
UREMA**

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BARRANQUILLA, ATLÁNTICO
2022**

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

MinCiencias y la Gobernación del Atlántico, por su apoyo y confianza en concederme la beca condonable a través del proyecto de Formación de Capital Humano de Alto Nivel Para la Región del Atlántico, de la Convocatoria No. 809, la cual me permitió formarme como Magister en Ingeniería Mecánica.

Ingeniero Antonio José Bula Silvera, Ph.D. por su orientación, enseñanzas, apoyo y su gran amistad incondicional. Su guía y grandes aportes científicos permitieron enfocarme de manera asertiva en este proceso de formación como magister, obteniendo resultados investigativos de calidad para el Atlántico y la comunidad científica.

A la Universidad del Norte, y especialmente al cuerpo docente del departamento de Ingeniería Mecánica, por la guía y la disponibilidad de compartir sus conocimientos los cuales fueron de gran ayuda para la realización de este proyecto.

Compañeros y amigos Omar Eljaik, Pedro Orozco, Daniel Cavadía, Daniel Pinilla, Wilson Guillín, Eliecer Mendoza, Andrés Rincón, Lily Arrieta, Orlando Olacerigui y Marielena Molinares por su apoyo profesional y humanístico.

RESUMEN

Colombia es un país con alta riqueza hídrica, con fuentes como el agua superficial, acuíferos, aguas torrenciales, aguas de alimentación glaciar o agua de mar. No obstante, esta disponibilidad del recurso hídrico no implica que pueda ser utilizado directamente, debido a factores como la contaminación o la presencia de niveles de sales y minerales perjudiciales para la salud, razón por la cual es necesario realizar un tratamiento previo a su consumo. Un ejemplo de esto se observa en el departamento del Atlántico, que, aunque cuenta con plantas de tratamiento y distribución de agua, en algunas temporadas del año no dan abasto para cubrir la demanda del preciado líquido; por otro lado, ubicar plantas de tratamiento en cada pueblo o municipio es poco viable por el alto coste económico que representa. Como solución a esta problemática, se propone la implementación de plantas desalinizadoras con osmosis inversa auto sostenible con energía solar, en lugares donde no se pueda obtener agua potable. Esta planta está basada en el principio físico de separación del agua y las sales disueltas mediante diferencias de concentración.

Con el fin de lograr lo anterior, el proyecto se dividió en cuatro fases. En la primera se definió el lugar y la capacidad necesaria para poder suplir la necesidad del corregimiento de Isabel López en Sabanalarga, el cual tiene falencias en el sistema de acueducto, pero cuenta con una fuente hídrica proveniente de agua de pozos. Se tomaron muestras de agua del sitio para su caracterización fisicoquímica, cuyos resultados mostraron la necesidad de tratamiento debido a las altas concentraciones que se encontraba en esta. Conociendo la concentración de los elementos presentes en el agua del sitio y el número de habitantes de Isabel López (3800 habitantes), se definieron las condiciones de operación de la planta para poder suplir de agua potable a este corregimiento. Con esta información, se seleccionaron los elementos necesarios para el buen funcionamiento de la planta, además de calcular su costo energético, con el cual se seleccionó el tipo de panel y el número de paneles solares. Estos datos se utilizaron para realizar un estudio exergético de la planta, en el cual se obtuvo una eficiencia de 45.4% en la bomba, debido al problema de la salmuera de rechazo. Por ello, se evaluaron opciones para el manejo de la salmuera, siendo la más viable su evaporación mediante una caldera alimentada con biomasa.

Palabras clave: osmosis inversa, exergía, salmuera, salobre.

ABSTRACT

Colombia is a country with high water wealth, with sources such as surface water, aquifers, torrential waters, glacial feeding waters or sea water. However, this availability of the water resource does not imply that it can be used directly, due to factors such as contamination or the presence of levels of salts and minerals that are harmful to health, which is why it is necessary to carry out a treatment prior to consumption. An example of this is observed in the department of Atlántico, which, although it has water treatment and distribution plants, in some seasons of the year they are not enough to cover the demand for the precious liquid; On the other hand, locating treatment plants in each town or municipality is not very feasible due to the high economic cost that it represents. As a solution to this problem, the implementation of self-sustaining reverse osmosis desalination plants with solar energy is proposed, in places where drinking water cannot be obtained. This plant is based on the physical principle of separation of water and dissolved sales through concentration differences.

In order to achieve the above, the project was divided into four phases. In the first, the place and the necessary capacity were defined to be able to meet the needs of the Isabel López district in Sabanalarga, which has shortcomings in the aqueduct system, but has a water source from well water. Water samples were taken from the site for its physicochemical characterization, the results of which showed the need for treatment due to the high concentrations found in it. Knowing the concentration of the elements present in the water at the site and the number of inhabitants of Isabel López (3,800 inhabitants), the operating conditions of the plant were defined in order to supply drinking water to this village. With this information, the necessary elements for the proper functioning of the plant were selected, in addition to calculating its energy cost, with which the type of panel and the number of solar panels were selected. These data were used to carry out an exegetical study of the plant, in which an efficiency of 45.4% was obtained in the pump, due to the problem of brine rejection. For this reason, options for brine management were evaluated, the most viable being its evaporation through a boiler fueled with biomass.

Keywords: reverse osmosis, exergy, brackish, brine

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	4
Abstract	5
Tabla de contenido	6
Lista de figuras	8
Lista de tablas	9
Nomenclatura	10
1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Marco teórico	13
1.1.1. Desalinización.....	13
1.1.2. Desalinización por membrana	13
1.1.3. Desalinización por sistemas térmicos.....	14
1.1.4. Energías renovables.....	15
1.1.5. Análisis exergético.....	16
1.2. Estado del arte	16
1.3. Planteamiento del problema.....	20
1.4. Justificación.....	21
1.5. Objetivos	22
1.5.1. Objetivo general.....	22
1.5.2. Objetivos específicos.....	22
1.6. Estructura del documento	22
2. selección del lugar y caracterización físico química del agua.....	24
2.1. Selección del lugar de estudio.	24
3. modelos osmosis inversa, exergia, tratamiento de salmuera.....	34
3.1. Modelo de osmosis inversa.....	34
3.1.1. Cálculo bombas	34
3.1.2. Balance de masa	35
3.1.3. Cálculo de sales	35
3.1.4. Cálculo de presión osmótica.....	36
3.1.5. Numero de membranas	37
3.2. Tratamiento de la salmuera.....	37

3.2.1. Destilación solar	37
3.2.2. Evaporación de la salmuera	39
3.3. Análisis exergético	40
3.3.1. Exergía de un flujo.....	41
3.3.2. Exergía de entrada	41
3.3.3. Destrucción de exergía.....	41
3.4. Paneles solares.....	46
3.4.1. Dimensionado del inversor de corriente	47
4. Resultados	48
4.1. Osmosis inversa.....	48
4.2. Calculo exergético.....	53
4.3. Paneles solares.....	55
4.4. Regulador.....	56
4.5. Inversor	56
4.6. Tratamiento de la salmuera.....	57
5. Conclusiones y recomendaciones para trabajo a futuro	64
5.1. Conclusiones.....	64
5.2. Recomendaciones para trabajo futuro	65
Referencias	66
6. ANEXOS	71
6.1. Planos de la planta de osmosis inversa	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Acumulado del número de publicaciones y número de citas de los temas claves en el 2000-2021. (“Analyze Results,” n.d.)	19
Figura 2. Mapa de estructura conceptual de la colección de datos. (“Analyze Results,” n.d.).....	19
Figura 3. Servicio de acueducto en el Atlántico tomado de (“Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV - 2018 Datos Abiertos Colombia,” n.d.).	21
Figura 4. Mapa de radiación solar tomado de (“Atlas Interactivo - Radiación IDEAM,” n.d.).....	24
Figura 5. Mapa hidrográfico del departamento del atlántico tomado de (“Hidrografía del Atlántico: Hidrografía Departamento del Atlántico Colombia,” n.d.).....	25
Figura 6. Distribución de las profundidades del nivel freático en los puntos de agua. Tomado de (“Hidrografía del Atlántico: Hidrografía Departamento del Atlántico Colombia,” n.d.).....	25
Figura 7. Lugares seleccionados para la toma de muestra de agua tomada de (“Sabanalarga - Google Maps,” n.d.).....	26
Figura 8. Winflows workspace. (SUEZ, 2021).....	30
Figura 9. Winflow wáter Type (SUEZ, 2021)	30
Figura 10. Winflow balance (SUEZ, 2021)	31
Figura 11. concentraciones de los compuestos	32
Figura 12. Acueducto Isabel López.	33
Figura 13. Tanques de agua de Isabel López.	33
Figura 14. Diagrama Osmosis inversa	35
Figura 15. Inicio Aspen plus	43
Figura 16. Aniones y cationes agregados Aspen plus.....	43
Figura 17. Método usado en Aspen plus.....	44
Figura 18. Determinación de estado muerto Aspen plus.....	44
Figura 19. Diagrama de flujo principal Aspen plus.	45
Figura 20. Especificación de estados final Aspen plus.....	45
Figura 21. Diagrama Osmosis inversa	48
Figura 22. curva característica de bombas de profundidad Pedrollo.....	52
Figura 23. curva característica bomba múltiple etapa D.	52
Figura 24. Diagrama osmosis inversa	53
Figura 25. Diagrama sistema fotovoltaico	57
Figura 26. Temperaturas ambiental y temperatura de superficie	58
Figura 27. Diagrama transferencia destilador solar	58
Figura 28. área necesaria para evaporar según las horas del día	59
Figura 29. medidas tanque para salmuera	59
Figura 30. Diagrama caldera de biomasa	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis descriptivo de la colección de documentos.....	18
Tabla 2. ensayos realizados (“Ensayos Fisicoquímicos - Universidad del Norte,” n.d.)	27
Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua resultados universidad del Norte. (“Ensayos Fisicoquímicos - Universidad del Norte,” n.d.).....	28
Tabla 4. Caracterización fisicoquímica resultados winflows.....	31
Tabla 5 condiciones iniciales.....	34
Tabla 6. flujos de planta de Osmosis inversa.....	48
Tabla 7. concentraciones de flujos fase 1.....	49
Tabla 8. Concentraciones flujos fase 2.....	49
Tabla 9. Presiones osmosis inversa.....	50
Tabla 10. Especificaciones de membrana LG BW 400 AFR G2.....	51
Tabla 11. condiciones de operación membrana LG BW 400 AFR G2.....	51
Tabla 12. Numero de membrana y tubos de la planta desalinizadora.....	51
Tabla 13. potencia de las bombas sumergibles Pedrollo; Error! Marcador no definido.	
Tabla 14. Requerimiento energético bombas.....	53
Tabla 15. calculo exergético de cada flujo.....	54
Tabla 16. características mecánicas del panel solar 540W 24 C monocristalino Atlas	56
Tabla 17. Características regulado KW1220.....	56
Tabla 18. Características inversor MAC 70 KTL3-X MV.....	57
Tabla 19. características caldera de biomada DHL.....	61
Tabla 20. costos estimados para planta desalinizadora autosostenible.....	61

NOMENCLATURA

Abreviaturas	
PRB	Presión recomendada de bombeo
ppm	Partículas por millón
Pot	Potencia, kW
Variables	
Q	Caudal, m ³
r	Factor de recuperación de agua mediante ósmosis inversa
b	Rechazo de sales
Π	Presión osmótica, bar
ϕ	Coefficiente osmótico del disolvente
T	Temperatura, K
t	Tiempo, s
m_i	Molalidad del componente i
C_i	Concentración del componente i de la solución, mg L ⁻¹
M_i	Masa molar del componente i
STD	Contenido en sales totales de la solución, mg L ⁻¹
I	Fuerza iónica, mg L ⁻¹
I'	Molalidad de una sal que correspondiera a un electrolito
S	Coefficiente empírico
a	Coefficiente empírico
b	Coefficiente empírico
c	Coefficiente empírico
d	Coefficiente empírico
N	Número de membranas
A	Área, m ²
Nu	Número adimensional de Nusselt
Gr	Número adimensional de Grashof
Pr	Número adimensional de Prandtl
Sc	Número adimensional de Schmidt
Sh	Número adimensional de Sherwood
g	Gravedad, m s ⁻²
P	Presión, bar

ρ	Densidad, kg m^{-3}
Φ	Humedad relativa
R	Constante de los gases
L_c	Longitud característica, m
Pe	Perímetro, m
∇_c	Viscosidad dinámica, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$D_{H_2O\text{-aire}}$	Difusividad de la masa del vapor de agua al aire
h_{masa}	Coefficiente de transferencia de masa, m s^{-1}
H	Razón de transferencia de calor, kW
\dot{m}	Razón de transferencia de masa, kg s^{-1}
C_p	Calor específico
h_t	Coefficiente de transferencia de calor
J	Flujo específico, m/d
N_{mod}	Número de paneles solares
C_{ed}	Consumo diario de energía, kWh
P_{mp}	Potencia pico del módulo, W
HS_p	Valor de horas pico de sol, h
Ψ	Exergía específica, kJ kg^{-1}
h	Entalpía específica, kJ kg^{-1}
s	Entropía específica, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
x	Energía, kW
W	Trabajo, kW
η	eficiencia
P_t	Factor de corrección por temperatura
c	Corriente, A
R_A	Número de Rayleigh
Subíndices	
v	Vapor
s	Superficie
∞	Aire
m	membrana
b	Bulbo seco
i	Bulbo húmedo

<i>sat</i>	Saturación
<i>d</i>	Operación
<i>A</i>	Alimentación
<i>p</i>	producto
<i>c</i>	Rechazo
0	Estado muerto
<i>in</i>	entrada
<i>min</i>	mínimo

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Marco teórico

1.1.1. Desalinización

La desalinización es un proceso de tratamiento por el cual el agua salobre se convierte en agua potable. Estos procesos principalmente se dividen en dos: los procesos de membrana y los procesos que requieren calor. Mientras que los procesos de membrana emplean diferencias de concentración para separar el agua de las sales, los procesos que requieren calor producen agua potable a partir de la evaporación del agua salobre y la posterior condensación del vapor de agua (Alnaimat & Klausner, 2012; Arellano-Escudero, 2015; Barrell et al., 2002).

1.1.2. Desalinización por membrana

La desalinización por membranas es un proceso en el cual se separa el agua en dos vertientes: una corriente de agua potable con baja concentración de sales disueltas y una corriente de salmuera concentrada. De este los métodos más utilizados son:

- a) ósmosis inversa (OI): es un proceso en el cual se separa los componentes de una solución, mediante una membrana semipermeable. Este fenómeno se da de forma natural en las células vegetales y animales, lo que les permite obtener agua del medio que lo rodea. En la ósmosis, el solvente pasa espontáneamente de una solución que tiene menor concentración a una de mayor concentración. Este movimiento de solvente continúa hasta alcanzar el equilibrio entre ambas sustancias. Si se añade energía en forma de presión a esta solución más concentrada de manera que se supere la presión osmótica (la cual es una manera de medir la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones), el flujo de solvente se invierte, fluyendo en el sentido de la presión aplicada (Di Martino, Avraamidou, Cook, & Pistikopoulos, 2021; Park et al., 2020; Park & Davies, 2021).

- b) electrodiálisis (ED): es un proceso por el cual la separación se da de forma electroquímica, donde se transfieren iones a través de membranas de intercambio iónico. Este tipo de membrana se conforman de una película que contiene grupos cargados, elaboradas a partir de materiales resinosos o poliméricos, así como distintos grupos funcionales que proveen propiedades de intercambio iónico, tales como cadenas de polímeros entrelazadas que contienen cargas fijas, neutralizadas con cargas opuestas móviles. En este caso, las cargas fijas repelen los iones de una carga similar mientras la membrana permanece permeable a iones de carga opuesta (SAENZ, 2009)(SAENZ, 2009). En la electrodiálisis, las sales ionizadas disueltas en la

sustancia pasan a través de la membrana, lo que elimina las partículas cargadas eléctricamente presentes en el agua; no obstante, en la práctica este proceso solo elimina 40% de las sales totales. Para aumentar la reducción de las sales totales, se emplea una cascada de células de electrodiálisis. Este proceso es recomendado para la destilación de aguas con baja salinidad (salobres), pero no es aconsejable para aguas marinas o con concentraciones de sales por encima de 5000 ppm, ya que el costo del proceso varía en forma proporcional a la cantidad de sales disueltas (Germán, Dévora-Isiordia, González-Enríquez, & Ruiz-Cruz, 2013). La presencia de materia orgánica, sílice disuelto y hierro en el agua de alimentación reduce la vida de las membranas (Germán et al., 2013).

- c) nano filtración (NF): es un proceso de filtración por medio de una membrana, generalmente usado en aguas que contienen bajo contenido de sólidos disueltos totales. Este proceso se encuentra entre la ósmosis inversa y la ultrafiltración por su nivel de separación. En la nano filtración se separan moléculas como la materia orgánica o iones polivalentes, que tienen un peso específico mayor a iones de sodio o cloro. Como resultado, este método permite la eliminación de carbono orgánico, nitratos, herbicidas, durezas, hierro, etc. del permeado, por lo que es usado para el ablandamiento del agua o como pretratamiento del proceso de osmosis inversa, debido a que es fácil la eliminación de metales pesados, nitritos y la turbiedad del agua.

1.1.3. Desalinización por sistemas térmicos

Estos procesos requieren de calor para lograr el cambio de fase en el líquido a vapor para condensarlo y obtener agua potable. Entre los principales sistemas térmicos podemos encontrar:

- a) destilación múltiple etapa (MED): Este método de desalinización consiste en varias etapas. En la primera etapa, se ingresa el vapor de agua salada que proviene de un intercambiador de calor y se rocía agua salada desde la parte superior. Como resultado, el vapor de agua se condensa, el agua rociada se evapora y la mezcla pasa a la siguiente etapa, donde es rociada nuevamente desde la parte superior del recinto. El flujo de vapor se condensa, mientras que parte del agua salada se evapora, pasa a un intercambiador y entra a un conducto hacia la siguiente etapa; esto se repite en las etapas siguientes.
- b) destilación flash múltiple etapa (MSF): este método consta de una serie de etapas, cada una de ellas a menor presión que la precedente. El proceso inicia al pasar el agua salada por un intercambiador de calor, que produce

vapor que posteriormente es condensado. En la primera etapa, una parte del agua se evapora instantáneamente por la caída de presión. Este vapor se encuentra con un flujo de agua salada, lo que hace que el vapor se condense y se recolecte. El agua que no se evaporó pasa a la siguiente etapa y así sucesivamente.

- c) Destilación solar (DS): Es el método más tradicional y convencional de obtener agua potable utilizando la energía solar. En este proceso, se introduce agua salina en un recipiente y se coloca una tapa de vidrio inclinada sobre el recipiente. La radiación solar calienta el agua dentro de la tapa de vidrio para hacer que se evapore de la capa superior. Dado que la cubierta está inclinada, el agua condensada forma una gota en la cubierta, las gotas se deslizan a través de ella hacia el colector de destilado debido a la superficie lisa de la cubierta (Sathyamurthy et al., 2017).

1.1.4. Energías renovables

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a partir de los recursos naturales, y que pueden ser producidas de manera indefinida e inagotable. En la actualidad, se usan para suplir la demanda energética en sitios remotos, ya que tienen la ventaja de producir poca contaminación y no dependen de la red eléctrica para suplir de energía todo tipo de máquinas. Entre las energías renovables más comunes podemos encontrar:

- a) Energía solar: Es la energía obtenida por el sol mediante el efecto fotovoltaico, lo cual es la producción de energía eléctrica directa a partir de la luz. La existencia de este fenómeno fue puesta de manifiesto por el físico Antoine Becquerel en el año 1839. Para poder obtener el efecto fotovoltaico, se requiere un material que sea capaz de absorber luz solar y que sea capaz de transformar la energía de la radiación en energía eléctrica. Con estas características podemos encontrar:
- Celdas fotovoltaicas de silicio cristalino: son celdas que tienen un coste más elevado en comparación a otro tipo de celdas fotovoltaicas y por estos son menos utilizadas, aunque tienen un mayor rendimiento.
 - Celdas fotovoltaicas de silicio policristalino: este tipo de celda tiene un rendimiento aceptable aunque un poco menor a las anteriormente nombradas, sobre todo en sitios de poca iluminación, pero son un poco más económicas, por lo que son ampliamente utilizadas (“Los destiladores solares | sitiosolar,” n.d.)

- b) Energía eólica: es la energía proveniente del viento. La alta variabilidad del viento y su dependencia de muchos factores, se hace necesario tener en cuenta información como velocidades medias, ráfagas, direcciones dominantes y eventuales obstáculos para seleccionar tanto los lugares de emplazamiento como las características constructivas de los elementos necesarios para aprovechar esta energía, siendo los más representativos las turbinas eólicas (“Manual de energía eólica - ESCUDERO LOPEZ, JOSE MARIA - Google Libros,” n.d.).

- c) Energía de la biomasa: La biomasa abarca todo un conjunto heterogéneo de materias orgánicas, tanto por su origen como por su naturaleza. En el contexto energético, este término se emplea para denominar la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta con potencial de reutilización. También tienen consideración de biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), aunque debido a las características específicas de estos residuos, se suelen considerar como un grupo aparte (“Energía de la Biomasa (volumen I) - Google Libros,” n.d.).

1.1.5. Análisis exergético

La Termodinámica permite establecer criterios generales con los que podemos juzgar el diseño y funcionamiento de los sistemas industriales en donde la energía juega un papel importante. En estos procesos, es necesario el cálculo de su eficiencia, y para ello es necesario conocer el producto obtenido y su coste final.

Como es conocido, la segunda ley de la termodinámica establece que los diferentes tipos de energía tienen diferentes calidades. Por ejemplo, la calidad de la energía mecánica y la eléctrica es comparable entre sí, debido a que estas se pueden transformar íntegramente entre ellas mediante procesos reversibles. Como la energía interna y el calor tienen una calidad diferente. es necesaria una definición de eficiencia independientemente del tipo de energía que se usa en el proceso; por lo que es necesario evaluar el sistema de otra manera, no en términos de energía si no mediante otra propiedad. Esta propiedad debe permitir evaluar con equivalencia los sistemas térmicos y los flujos, al menos teóricamente. Esta propiedad es la exergía, la cual es la mínima cantidad de trabajo a partir de un ambiente de referencia (Valero et al, 1995).

1.2. Estado del arte

La tecnología de desalinización por membranas ha tenido grandes cambios en los últimos años con grandes avances para aumentar su eficiencia, lo que ha permitido grandes avances en este tipo de tecnología. Como resultado, la desalación del agua

del mar se realiza casi exclusivamente por esta técnica. Los sistemas de desalinización más usados en la actualidad son aquellos que trabajan mediante membranas y los de evaporación; por el lado de la tecnología de membranas, En el caso de desalación por ósmosis inversa (RO), tiene su origen en la reversibilidad del fenómeno natural de ósmosis (Pan, Haddad, Kumar, & Wang, 2020b; Sarai Atab, Smallbone, & Roskilly, 2018).

Esta técnica de obtención de agua potable por osmosis inversa es compatible con el acoplamiento de energías renovables, y al ser la membrana capaz de trabajar de manera continua, se puede combinar con otros procesos. (Jamaly, Darwish, Ahmed, & Hasan, 2014). El proceso de desalinización por osmosis inversa se usa principalmente para el tratamiento de agua de mar debido a la facilidad del manejo de agua de rechazo que se regresa al mar, pero estas también son aplicables a agua salobres (Alsarayreh, Al-Obaidi, Farag, Patel, & Mujtaba, 2021), esto dependerá principalmente de la membrana a usar y las presiones de trabajo (Jiang, Li, & Ladewig, 2017).

Los procesos de osmosis inversa se pueden clasificar según el tipo de agua usada. Por ejemplo, para el agua de bajas concentraciones se emplea la osmosis inversa para agua salobre, que se usa para aguas de 5000 ppm o inferior (Pan, Haddad, Kumar, & Wang, 2020a). Hoy en día, la osmosis inversa de agua salobre ha adquirido un creciente interés, particularmente cuando se acopla este proceso con energías alternativas (Nguyen Xuan Que et al., 2021).

Debido a que la presión osmótica está relacionada directamente con las concentraciones de la sustancia, el cálculo de esta se hace mediante un balance de masa. Con esto es posible el cálculo de la presión osmótica (Zhangxin Wang, Feng, Chen, He, & Elimelech, 2021). Al ser la presión osmótica menor, las bombas usadas en este proceso serán más económicas que las usadas en el proceso usual de osmosis (Lai, Long, Liu, & Liu, 2021). Al usarse concentraciones menores a las usadas para la destilación de agua de mar, el flujo de rechazo es de menor concentración al flujo de rechazo de la destilación de agua de mar lo que hace que en el proceso de osmosis inversa de agua salobre el factor de recuperación pueda ser mayor; esta es la relación entre el flujo de permeado y el flujo de entrada (Khanzada, Khan, & Davies, 2017). Al ser menor las concentraciones usadas en el proceso de osmosis inversa de agua salobre, las membranas usadas en este proceso son más económicas (Barrell et al., 2002).

En los procesos de osmosis inversa de agua salobre, los modelos exergéticos permiten analizar los procesos de manera detallada y así poder identificar posibles mejoras del sistema (Fellaou, Ruiz-Garcia, & Gourich, 2021). Este método es muy usado en la actualidad para el análisis de equipos (Carrasquer, Martínez-Gracia, & Uche, 2016; Gasmi, Belgaieb, & Hajji, 2010; Panepinto, Fiore, Zappone, Genon, &

Meucci, 2016). Para el tratamiento del agua de alta concentración producto del proceso de osmosis inversa se evaporará el agua de rechazo usando el vapor de una caldera alimentada con biomasa para que el agua de rechazo no afecte al medio ambiente.

La revisión bibliográfica presentada en este trabajo se hizo al combinar los siguientes términos de búsqueda y términos afines a éstos: “reverse osmosis”, “brackish”, “solar-powered” y “exergy analysis”. Estos términos se buscaron en el tema de documentos contenidos en la base de datos Web of Science de Clarivate Analytics, y se seleccionaron los resultados en donde coinciden los temas de los términos utilizados. La búsqueda de documentos se realizó el 10 de enero del 2022, limitando la búsqueda a documentos publicados a partir del año 2000. Datos de estadística descriptiva de los resultados se encuentran en la Tabla 1. En total, se obtuvieron 479 documentos que incluyen artículos científicos, artículos de revisión, resultado de conferencias, entre otros.

Tabla 1. Análisis descriptivo de la colección de documentos.

Descripción	Resultados
Documentos	479
Periodo	2000 – 2021
H-index (según web of science)	58
Promedio de citaciones por documento	27,13
Número total de citaciones	12993
Artículos en que se citan	8246

En la Figura 1 se muestra el incremento del número de publicaciones desde el año 2010 hasta el 2022 en la temática de osmosis inversa de agua salobre y desalinización con energía solar. Desde el año 2012 se ha notado un incremento a gran velocidad en el número de publicaciones, lo que da indicios de que la temática aún se encuentra en desarrollo y los temas de investigación siguen teniendo relevancia en la actualidad.

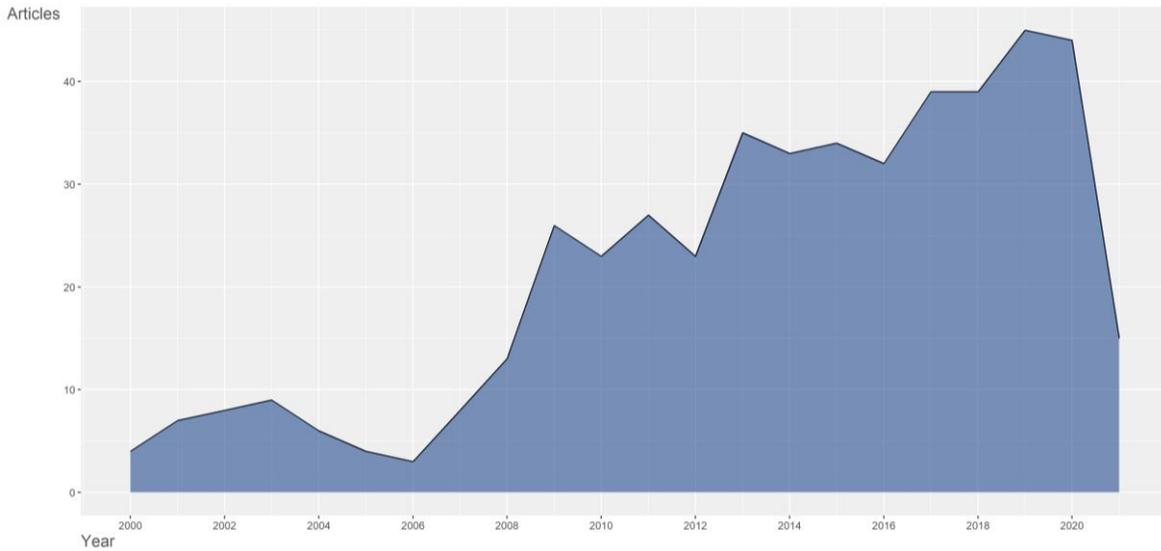


Figura 1. Acumulado del número de publicaciones y número de citas de los temas claves en el 2000-2021. (“Analyze Results,” n.d.)

Estudios de bibliometría han sido incluidos en este trabajo, utilizando la herramienta Bibliometrix, el cual es un paquete de análisis de datos disponible el cual es ejecutado desde R (Aria & Cuccurullo, 2017) utilizando un algoritmo de agrupación en *clusters* que ejecuta internamente esta herramienta, se obtuvo el histograma de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.2**. De este gráfico, se puede observar que las investigaciones son lideradas por Estados Unidos y China, y a menor escala en países europeos y asiáticos, entre los que se destacan India, Reino Unido y Arabia Saudita.

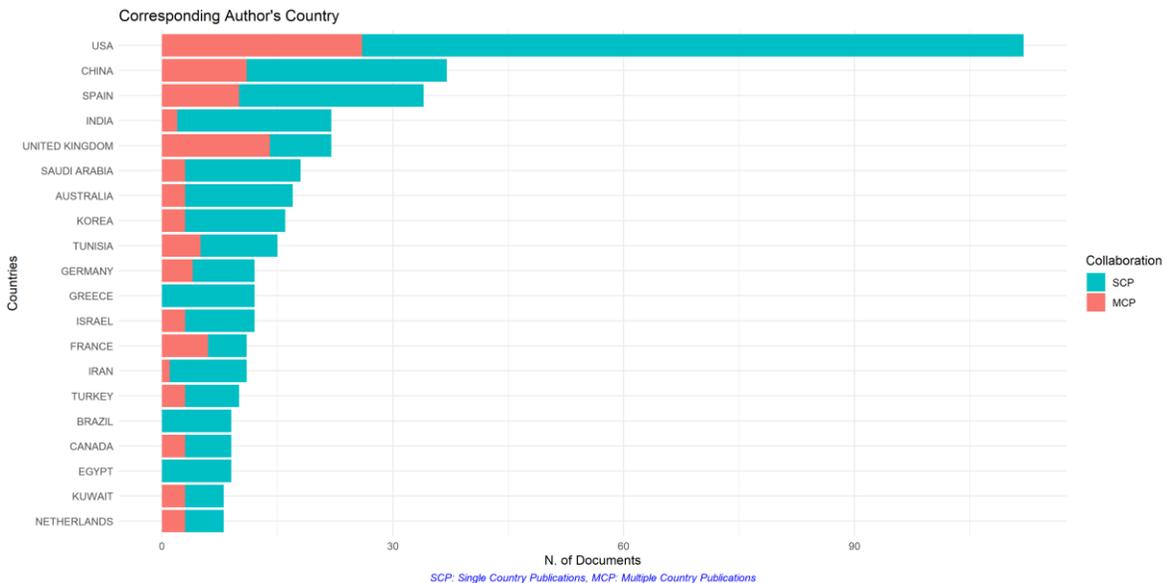


Figura 2. Mapa de estructura conceptual de la colección de datos. (“Analyze Results,” n.d.)

Debido a la escasez de agua, se empezó a implementar tecnologías para poder saciar la necesidad, lo que incrementó la investigación de la tecnología de osmosis inversa (Okampo & Nwulu, 2021), las cuales se empleaban inicialmente en lugares desolados donde no se tenía acceso al agua potable, usando como fuente el agua de mar (Zhuo Wang, Zhang, Wang, Zhang, & Ma, 2021).

Luego de esto, se empezó a implementar este método en lugares alejados del mar donde se usaban agua de lagos y agua subterránea (Lai et al., 2021). Debido a que los lugares sin acceso a agua potable usualmente también carecen de energía eléctrica, se genera como consecuencia la implementación de las plantas desalinizadoras alimentadas con energías renovables, lo que es un tema que se sigue investigando para poder aumentar su eficiencia y proveer del preciado líquido a poblaciones que no tienen la posibilidad de obtener agua potable por medios convencionales (Sanna, Buchspies, Ernst, & Kaltschmitt, 2021) .

1.3. Planteamiento del problema

La falta de recursos hídricos potables, las condiciones climáticas que afectan al país como el fenómeno del Niño (Escobar, 2011), la falta de conexión de las plantas centrales de potabilización de agua, Aun cuando la región del Atlántico está bastante desarrollada en la parte de acueductos esta aún tiene regiones en las cuales se puede encontrar falencias en esta ámbito, Según las cifras mostradas en la Figura 3 se puede observar que los municipios de Piojo, Tubará, Campo de la Cruz y Sabanalarga solo del 50 a 70% poseen acueductos, lo que implica que hay varios lugares en los cuales no hay canales de interconexión y que se tenga un suministro de agua constante se dificulta por lo cual es necesario recurrir a alternativas como transporte por carrotanque o usando agua de pozo de la región.

(“Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV - 2018 | Datos Abiertos Colombia,” n.d.), además de no contar con un servicio eléctrico estable, por lo cual la mayoría usa generadores para suplir la falta de energía (Escobar, 2011). Por la falta de preciado, líquido muchos pobladores consumen el agua de las fuentes hídricas cercanas, las cuales no cumplen con las condiciones mínimas y en algunos casos causa problemas de salud (Figueroa, 2021).

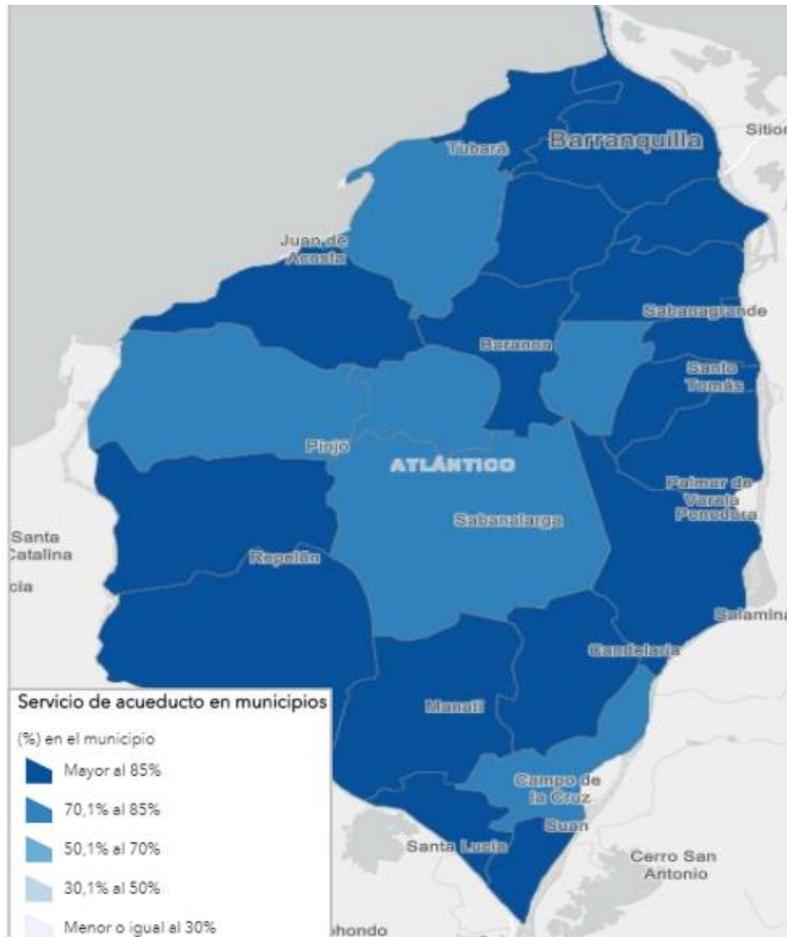


Figura 3. Servicio de acueducto en el Atlántico tomado de (“Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV - 2018 | Datos Abiertos Colombia,” n.d.).

1.4. Justificación

Las necesidades del uso de agua por parte del ser humano cada día son mayores, por esto en la actualidad la escasez de agua para consumo humano, agricultura, industria y demás se ha acrecentado considerablemente. A esto se le suma el número de muertes a causa de desnutrición, enfermedades pulmonares o digestivas, debido al consumo de agua no potable (Davies & Giesen, 1994; Pietrucha-Urbanik & Rak, 2020; Simonovic, 2003). Por esta razón, es indispensable que toda la población posea suministro del preciado líquido, el cual no es el caso en Colombia, más puntualmente en el departamento del Atlántico, donde varios corregimientos se encuentran alejados de fuente de agua potable (Park et al., 2020). Como resultado, es necesario el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías y técnicas viables para potabilizar el agua proveniente de las fuentes hídricas disponibles y poder suministrar a las poblaciones de agua potable.

Por lo anterior se propone la implementación de una planta desalinizadora autosostenible para poder suplir las necesidades básicas y, como estas poblaciones

no cuentan con fuente de energía estable, se usarán paneles fotovoltaicos. La energía solar fotovoltaica se encuentra en un gran crecimiento (Figuroa, 2021), haciéndolos más atractivos desde el punto de vista económico. De igual forma, también se han vuelto populares en zonas no interconectadas, donde el acceso a electricidad es muy difícil de obtener o muy inestable.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar una planta piloto desalinizadora autosostenible con el fin de mitigar la falta de agua en el sur del Atlántico.

1.5.2. Objetivos específicos

- Seleccionar el lugar donde se propondrá la planta desalinizadora de acuerdo a las necesidades de la comunidad y disponibilidad del recurso.
- Caracterizar fisicoquímicamente el agua a ser tratada.
- Determinar las condiciones de operación la planta piloto desalinizadora de acuerdo con las condiciones de operación tales como: cantidad, flujo, cantidades de sólidos suspendidos, presiones de trabajo, entre otros.
- Realizar un análisis exergético de la planta de osmosis inversa con fines de identificar posibles puntos de optimización.
- Seleccionar sistema de tratamiento de agua residual de la planta de osmosis inversa con el fin de dar manejo adecuado a la salmuera.

1.6. Estructura del documento

Este documento consta de 4 capítulos el cual el contenido es el siguiente: en el capítulo 1, se realizaron diferentes búsquedas en bases de datos reconocidas y confiables que estaban actualizadas, que presentaron información consistente sobre la temática pertinente a este proyecto y dieron una directiva clara para el planteamiento del problema y su posible solución.

En el capítulo 2 se seleccionó el lugar donde se propone ubicar la planta desalinizadora teniendo en cuenta los mapas hídricos y solares para seleccionar una ubicación adecuada para el funcionamiento de la planta desalinizadora. Además, se realizó una caracterización fisicoquímica del agua del sitio seleccionado, se tomaron muestras de los yacimientos y fuentes de agua para saber las condiciones en las que estas se encuentran.

En el capítulo 3 se plantearon las ecuaciones y modelos utilizados para el cálculo de las condiciones de trabajo de la planta de osmosis inversa, con el fin de poder

estimar la energía requerida para el funcionamiento de esta, los modelos para el cálculo de los gastos energéticos de la planta, así como los cálculos exergéticos en cada proceso de la planta de osmosis inversa. Además de ello, estos cálculos determinaron las opciones para el tratamiento de la salmuera producto de la planta de osmosis inversa.

En el capítulo 4 se expondrán los resultados obtenidos con las ecuaciones y modelos planteados en el capítulo 3 para representar las condiciones de operación de la planta y los elementos que cumplen las condiciones de operación de la planta además de la alternativa seleccionada para hacerle frente a la problemática de la salmuera.

2. SELECCIÓN DEL LUGAR Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO QUÍMICA DEL AGUA

En este capítulo se seleccionará el lugar para la implementación de la planta desalinizadora para cubrir la demanda de agua. Para esto se tendrá en cuenta los lugares con alta radiación solar, con fallencias o falta de acueducto, con esto se observará las posibilidades de los cuerpos de agua presente en estos lugares.

2.1. Selección del lugar de estudio.

Como se mencionó en el capítulo 1 los municipios de Piojo, Tubará, Campo de la Cruz y Sabanalarga son los municipios con mayor falencia en el sistema de acueductos en el departamento del Atlántico. Teniendo en cuenta esto, es necesario seleccionar cuáles de estos municipios cumplen con las características necesarias para la implementación de proyecto propuesto; una de estas es la radiación solar incidente. Como se puede observar en la Figura 4, en el departamento del Atlántico se tiene alta radiación solar diaria en los municipios que se encuentran al sur del departamento, lo que contrasta con la Figura 5 en la que podemos observar los recursos hídricos disponibles en cada municipio. Como resultado, Sabanalarga es el municipio con mayor recurso hídrico de los 4. Además de ello, este municipio dispone de aguas subterráneas a una profundidad promedio de 9 a 15 metros, como se observa en la Figura 6, lo que hace que más fácil su obtención. Por lo anteriormente mencionado, se seleccionó como lugar de estudio el municipio de Sabanalarga, debido a que presenta una gran riqueza hídrica y una radiación solar aceptable.

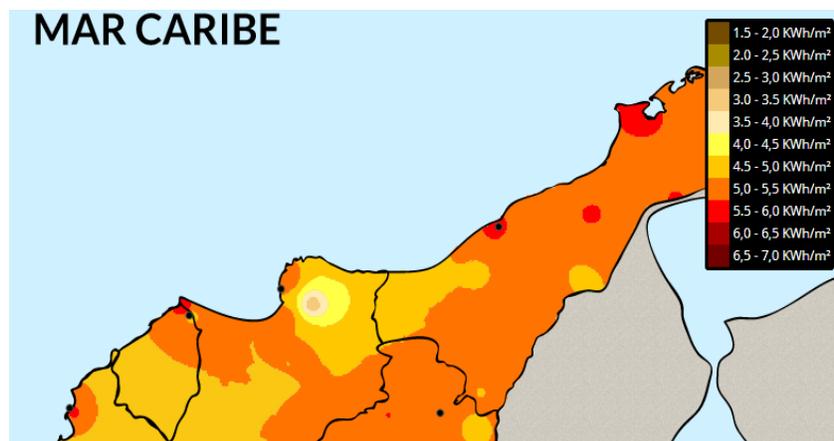


Figura 4. Mapa de radiación solar tomado de ("Atlas Interactivo - Radiación IDEAM," n.d.).

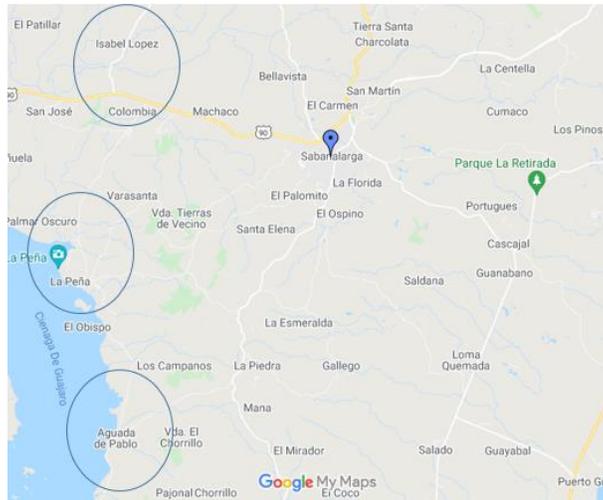


Figura 7. Lugares seleccionados para la toma de la muestra de agua tomada de (“Sabalalarga - Google Maps,” n.d.).

En Colombia, la Resolución 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social establece los valores permisibles para ciertas características fisicoquímicas del agua que pueden afectar la salud humana (LOS MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE & TERRITORIAL, 23AD). Las características definidas en la resolución son las siguientes:

- **Alcalinidad y pH:** El pH nos indica la concentración de iones de hidrógeno presentes en el agua, lo que representa la acidez del agua; por otro lado, la alcalinidad es la propiedad que posee el agua para neutralizar o regular los cambios de acidez,
- **Oxígeno disueltos:** Esto representa la cantidad de oxígeno presente en el cuerpo de agua y es un indicativo de la posibilidad de crecimiento de materia animal y vegetal, consideradas como contaminantes.
- **Fosfatos:** Los niveles de fosfato en el agua nos indican la presencia de detergentes sintéticos vertidos en el cuerpo de agua. Altos niveles de fosfatos pueden causar un crecimiento de algas en el cuerpo de agua.
- **Nitratos:** Los niveles de nitratos nos indican la cantidad de materia orgánica esta puede ser animal o vegetal descompuesta en el cuerpo de agua. Altos niveles reducen los niveles de nitritos en el sistema digestivo causando metahemoglobina en los infantes lactantes.
- **Sólidos disueltos totales:** Nos indica las sales disueltas y las partículas en suspensión estas pueden ser de orgánicas o inorgánicas presentes en el cuerpo de agua.
- **Conductividad:** El parámetro de conductividad nos indica la presencia de sales ionizantes en el cuerpo de agua están pueden ser cloruros o iones de sodio entre otras.

- **Turbiedad:** La turbiedad indica el grado de falta de claridad o transparencia en el cuerpo de agua debido al material particulado.
- **Dureza total:** Este representa la suma de las durezas individuales debidas a los iones de calcio, magnesio, estroncio y bario en forma de carbonato o bicarbonato. Este indica el contenido sales de calcio y magnesio en el agua, una alta dureza afecta el sabor del agua.
- **Sulfatos:** Sulfatos pueden ser sales solubles en agua, que se encuentran de manera natural en muchos minerales, además se usa en la industria química, altos niveles de sulfatos en el agua pueden causar diarrea y deshidratación.
- **Nitritos:** Los nitritos se usan como indicador de contaminación por material fecal, además estos pueden producir material cancerígeno.
- **Cloruros:** indica los niveles de cloruro, que pueden provenir de minerales de sal. Una alta concentración de este afectará el sabor del agua y puede ser perjudicial para la salud.
- **Hierro:** indica los niveles de hierro que se encuentra en el cuerpo de agua. altos niveles de hierro afectan el color, olor y sabor del agua de manera indeseable.
- **Sedimentos:** Este nos indica si la muestra tiene partículas de sedimentos de arena o arcilla y otras partículas sueltas de suelo. Estos pueden tener su origen por la erosión del suelo o las corrientes de viento.
- **Color:** Este es un parámetro visual que nos permite conocer la calidad del agua el color del agua se debe a la presencia de materia orgánica en el cuerpo de agua.

Se hicieron las pruebas de las propiedades que se establecen según la resolución vigente colombiana. Estas se hicieron en los laboratorios de la Universidad del Norte estos se pueden ver en la Tabla 2 y el resumen de los resultados obtenidos se pueden ver en la Tabla 3, donde los valores señalados en rojo son aquellos que exceden los límites permisibles.

Tabla 2. Ensayos realizados (“Ensayos Fisicoquímicos - Universidad del Norte,” n.d.)

Ensayo	Técnica	Referencia estándar
pH	Potenciometría	4500-H+ B.
Alcalinidad	Volumetría	2320B
Oxígeno Disuelto	Electrometría	4500-O G.
Conductividad/Salinidad	Electrometría	2510 B.
Color Verdadero	Comparación Visual	2120 B
Cloro residual total	Colorimetría	4500-CI G

Hierro Total	Espectrofotometría visible	3500-Fe B
Dureza Total	Complejometría	2340 C
Nitritos	Espectrofotometría o ISE	4500 NO2 B.
Nitratos	Espectrofotometría o ISE	4500 NO3 B.
Sulfatos	Termo gravimetría o Turbidimetría	4500 SO2-4 C.
Fósforo Total	Espectrofotometría visible	4500-P E.
Sólidos Suspendidos Totales	Termo gravimetría a 105oC	2540 D E.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica del agua resultados universidad del Norte. (“Ensayos Físicoquímicos - Universidad del Norte,” n.d.)

	Isabel López	Aguada de pablo	La peña	
Población	3800	6500	10000	
Fuentes de agua	subterránea	Superficial	Superficial	
Caracterización fisicoquímica del agua				Valores permitidos según resolución colombiana
pH	7,34	7,66	7,88	9
mg/L DO	7,36	6,7	3,16	10
uS/cm CONDUCTIVIDAD	2786	1233	1193	1000
ppm TDS	1397	617	597	300
FNU TURBIDEZ	2	15,2	35	2
COLOR	7,46	30,2	41,72	15
SEDIMENTOS	0	0	0	
ALCALINIDAD	100	149	117	200
CLOURS	24,106	40.413	27,651	250
DUREZA TOTAL	14.2	5.6	8	300
FOSFATOS mg/l	9,02	16,28	118,18	0,5
HIERRO mg/	0	3,49	1,96	0,3

SULFATOS mg/	8,49	8,64	8,32	250
NITRATOS mg/	8,2	6,6	38,7	10
NITRITOS mg/	0,863	0,735	2,423	0,1

En la Tabla 3 se puede observar que algunos de los parámetros están fuera de lo establecido por la norma; por lo tanto, es necesario que el agua sea tratada para el consumo humano y que no represente un riesgo para la salud, siendo Isabel López el caso más crítico, con una mayor concentración de sales que los otros lugares seleccionados. Teniendo en cuenta lo anterior, se propone que en el corregimiento de Isabel López se implemente una planta desalinizadora para poder proveer de agua potable a su población.

Debido a las limitaciones que se tienen en el laboratorio de la Universidad del Norte para poder identificar todos los componentes de la muestra seleccionada, se usará el programa Winflows® para realizar un balance de masa y así obtener las concentraciones del resto de componentes como bario, bromo, dióxido de carbono, carbonato, silicio.

El software de diseño Winflows® es un programa de simulación intuitivo y fácil de usar que permite a los usuarios diseñar rápidamente sistemas de ósmosis inversa (RO) y nanofiltración (NF). El software proporciona exposición a las membranas RO/NF enrolladas en espiral de SUEZ y a las pilas EDI E-Cell junto con productos de filtros de cartucho extensos, así como sistemas NF y RO prediseñados. (SUEZ, 2021)

Para calcular los componentes faltantes de la muestra de agua, se siguieron los pasos descritos a continuación:

- a) Abrir el programa Winflows®
- b) En la opción input seleccionar la opción feed como se muestra en la Figura 10.

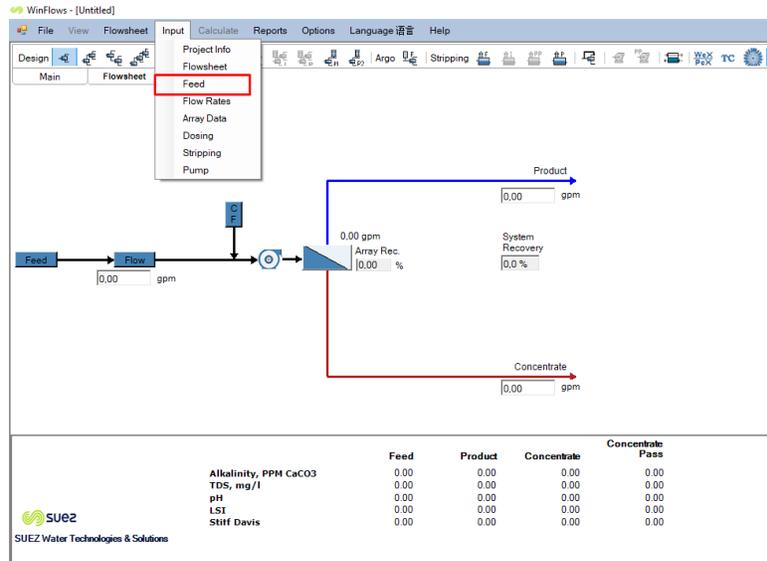


Figura 8. Winflows workspace. (SUEZ, 2021)

- c) En el cuadro de dialogo de “water type” se selecciona el tipo de agua en el cual se selecciona “well water” y se escriben los resultados obtenidos en las pruebas de la Universidad del Norte.

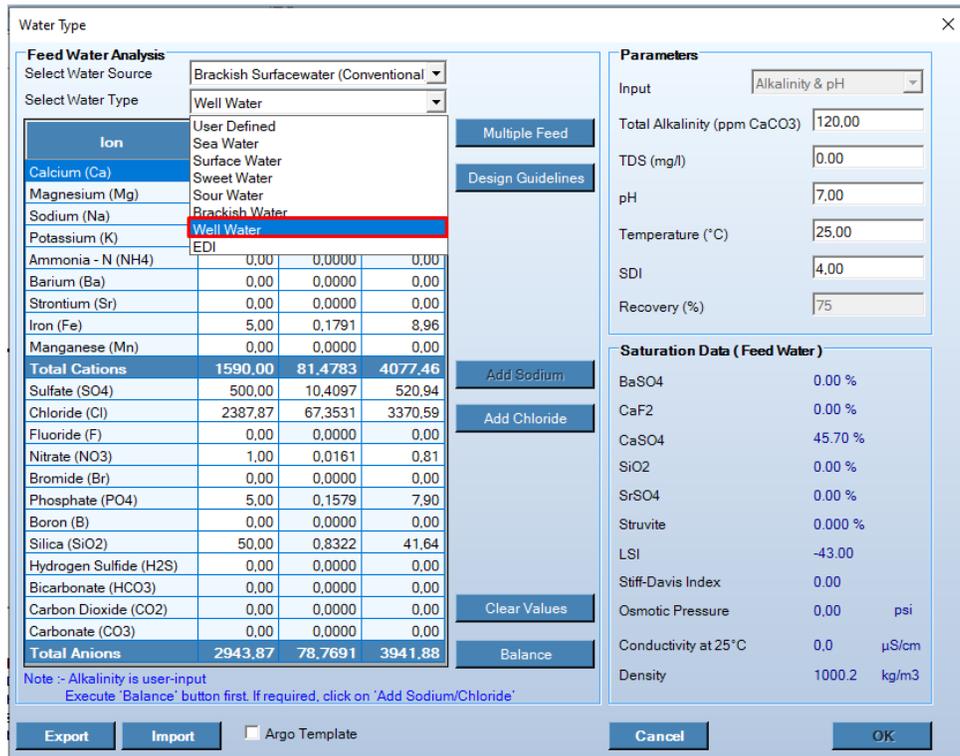


Figura 9. Winflows water Type (SUEZ, 2021)

- d) En la misma pestaña de “water type” seleccionar la opción “Balance” como se muestra en la Figura 12.

Water Type

Feed Water Analysis

Select Water Source: Brackish Surfacewater (Conventional)

Select Water Type: Well Water

Ion	mg/l	meq/l	ppm as CaCO3
Calcium (Ca)	1200,00	59,8832	2996,77
Magnesium (Mg)	125,00	10,2859	514,74
Sodium (Na)	250,00	10,8743	544,19
Potassium (K)	10,00	0,2558	12,80
Ammonia - N (NH4)	0,00	0,0000	0,00
Barium (Ba)	0,00	0,0000	0,00
Strontium (Sr)	0,00	0,0000	0,00
Iron (Fe)	5,00	0,1791	8,96
Manganese (Mn)	0,00	0,0000	0,00
Total Cations	1590,00	81,4783	4077,46
Sulfate (SO4)	500,00	10,4097	520,94
Chloride (Cl)	2387,87	67,3531	3370,59
Fluoride (F)	0,00	0,0000	0,00
Nitrate (NO3)	1,00	0,0161	0,81
Bromide (Br)	0,00	0,0000	0,00
Phosphate (PO4)	5,00	0,1579	7,90
Boron (B)	0,00	0,0000	0,00
Silica (SiO2)	50,00	0,8322	41,64
Hydrogen Sulfide (H2S)	0,00	0,0000	0,00
Bicarbonate (HCO3)	0,00	0,0000	0,00
Carbon Dioxide (CO2)	0,00	0,0000	0,00
Carbonate (CO3)	0,00	0,0000	0,00
Total Anions	2943,87	78,7691	3941,88

Note :- Alkalinity is user-input
Execute 'Balance' button first. If required, click on 'Add Sodium/Chloride'

Parameters

Input: Alkalinity & pH

Total Alkalinity (ppm CaCO3): 120,00

TDS (mg/l): 0,00

pH: 7,00

Temperature (°C): 25,00

SDI: 4,00

Recovery (%): 75

Saturation Data (Feed Water)

BaSO4: 0,00 %

CaF2: 0,00 %

CaSO4: 45,70 %

SiO2: 0,00 %

SrSO4: 0,00 %

Struvite: 0,000 %

LSI: -43,00

Stiff-Davis Index: 0,00

Osmotic Pressure: 0,00 psi

Conductivity at 25°C: 0,0 µS/cm

Density: 1000,2 kg/m3

Buttons: Multiple Feed, Design Guidelines, Add Sodium, Add Chloride, Clear Values, Balance, Export, Import, Argo Template, Cancel, OK

Figura 10. Winflows balance (SUEZ, 2021)

con esto se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4. Caracterización fisicoquímica resultados Winflows

Componente	ppm
Ca ²⁺	338,7
Mg ²⁺	35,28
Na ⁺	114,33
K ⁺	2,82
SO ₄ ²⁻	8,25
Cl ⁻	852,4
NO ₃ ⁻	7,97
PO ₄ ³⁻	8,77
HCO ₃ ⁻	12,53
CO ₃ ²⁻	0,03
SiO ₂	14,11
CO ₂	0,55

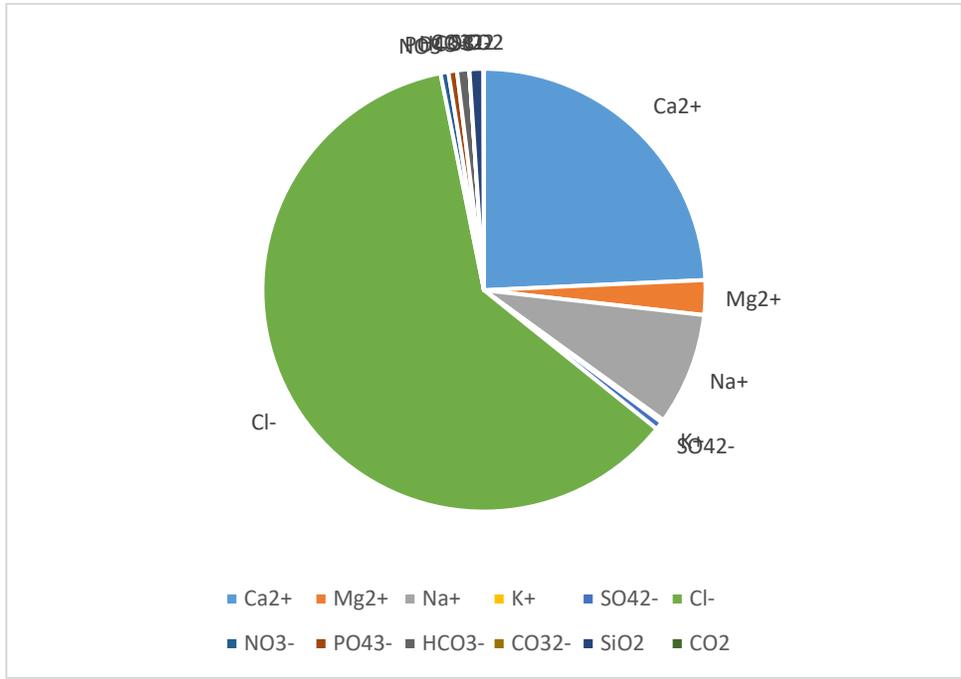


Figura 11. Concentraciones de los compuestos

Según lo mencionado por el líder de la Junta de Acción Comunal en la región de Isabel López “la mayor parte de la población consume agua del acueducto dispensador que se encuentra en la región” (Figueroa, 2021) , el cual no cuenta con el equipo para el tratamiento de agua, y solo funciona para suministrar agua del pozo principal, que no es apta para el consumo humano, y provoca en la población deshidratación y diarrea en algunos casos. Como solución a esta problemática, la gobernación del Atlántico instaló 4 tanques en esta región de 5000 L c/u como se puede ver en la Figura 13, los cuales son rellenos 2 veces a la semana; no obstante, los pobladores mencionan que muchas veces hay retrasos con el suministro de agua y que la cantidad de agua almacenada no da abasto para la población, por lo cual los pobladores se ven obligados a seguir consumiendo el agua del acueducto la cual afecta su salud.



Figura 12. Acueducto Isabel López.



Figura 13. Tanques de agua de Isabel López.

3. MODELOS OSMOSIS INVERSA, EXERGIA, TRATAMIENTO DE SALMUERA

Al implementar una planta de osmosis inversa para la desalación del agua es necesario seleccionar los componentes fundamentales de esta los cuales son los siguientes:

- Bomba de profundidad
- Bomba de alta presión
- Membrana

3.1. Modelo de osmosis inversa

Según (Santana, Bonilla Tovar, & Castillo Sotomayor, 2015) el promedio de consumo de agua por familia mensual en Isabel López, es de 20 metros cúbicos. De acuerdo con las declaraciones del líder social de esta población, Isabel López cuenta con un promedio de 3800 habitantes, con familias de 6 individuos. Esto proporciona un total de 634 familias, lo que equivale a un consumo mensual de 12667 m³ en Isabel López.

Tabla 5 Condiciones iniciales

		unidades
consumo mensual	12667	m ³
consumo diario	423	m3

Para la selección de la bomba de profundidad ya conociendo el caudal que se requiere como se ve en la Tabla 5. Además de conocer las profundidades de las aguas subterráneas en el sector seleccionado se puede calcular la potencia para seleccionar la bomba de profundidad.

3.1.1. Calculo bombas

Las bombas sumergibles son equipos en acero inoxidable para soportar la agresividad de las aguas subterráneas, y disponen de un motor eléctrico de corriente continua, a una tensión nominal que puede abarcar desde 12/24V hasta 300/500 V en modelos diseñados para ofrecer grandes caudales y presiones. Para la selección de la bomba es necesario el cálculo de la potencia de la bomba es cual se calcula de la siguiente manera:

$$P_B(Hp) = \frac{Q\rho gh_B}{746\eta} \quad (\text{Ec.1})$$

Para poder calcular la bomba de alta presión es necesario saber las concentraciones y los valores de presión osmótica. De la misma forma, se requiere realizar un balance de masa con los valores de caudal de entrada y la concentración de entrada, para poder conocer el valor de las concentraciones. Además, conociendo el factor de recuperación en el sistema de osmosis inversa, se puede conocer el flujo de permeado

3.1.2. Balance de masa

Aplicando el concepto de balance de masa, los flujos de entrada serán igual a los de salida siendo el flujo de entrada Q_A y los flujos de salida Q_P el flujo de permeado y Q_C flujo de rechazo o flujo de residuo como se puede ver en la Figura 14.

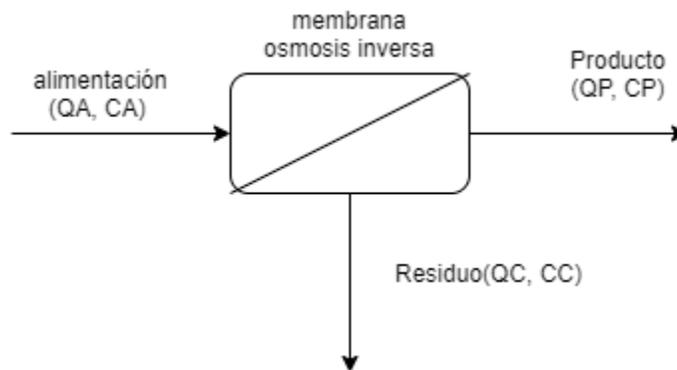


Figura 14. Diagrama Osmosis inversa

$$Q_A = Q_P + Q_C \quad (\text{Ec.2})$$

Otra manera de calcular los flujos en el proceso de osmosis inversa es conociendo el factor de recuperación r es cual indica que fracción del flujo de entrada se convierte en permeado

$$Q_A = \frac{Q_P}{r} \quad (\text{Ec.3})$$

3.1.3. Cálculo de sales

De igual manera aplicando la conservación de la masa, pero agregando las concentraciones se pueden calcular las concentraciones del flujo de permeado C_P y el de rechazo C_C .

$$Q_A * C_A = Q_P * C_P + Q_C * C_C \quad (\text{Ec.4})$$

$$C_P = \frac{Q_A * C_A - Q_C * C_C}{Q_P} \quad (\text{Ec.5})$$

Otra manera de calcular la concentración de rechazo C_C ya conociendo el porcentaje de rechazo de sales R que es una propiedad de la membrana

$$C_C = \frac{R \cdot C_A}{1 - R} \quad (\text{Ec.6})$$

Al conocer las concentraciones de permeado y rechazo se puede calcular la presión osmótica.

3.1.4. Cálculo de presión osmótica

Al ser la presión osmótica Π una de las propiedades más importantes para el proceso de osmosis inversa, es necesario calcularla esta depende de las molaridades m_i esta se calcula según la ecuación 8.

$$\Pi = 0.08308 \cdot \phi \cdot T \cdot \sum m_i \quad (\text{Ec.7})$$

La molalidad de cada componente se calcula de la siguiente manera:

$$m_i = \frac{C_i}{1000 \cdot M_i \cdot \frac{10^6 - \text{STD}}{10^6}} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde

C_i = concentración del componente i de la solución expresada en mg/l

M_i = masa molar del componente i

STD = contenido de sales totales en mg/l

el coeficiente osmótico del disolvente ϕ viene dado por la relación siguiente:

$$\phi = 1 - \frac{S}{3.375 \cdot I} \cdot \left(A - 2 \cdot \text{LN} \cdot A - \frac{1}{A} \right) + B \cdot I' + C \cdot (I')^2 \quad (\text{Ec.9})$$

Dónde I es la fuerza iónica; I' sería la molalidad de una sal que correspondiera a un electrolito y cuya masa molar fuera el promedio de las sales marinas (masa molar aparente) y S , A , B y C coeficientes empíricos (Mercado, 2015); para calcularlos se utilizan las siguientes expresiones:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \sum (m_i \cdot Z_i^2) \quad (\text{Ec.10})$$

$$I' = \frac{1}{2} \cdot \sum m_i \quad (\text{Ec.11})$$

$$S = 1.17202 \cdot \left(\frac{\sum (m_i \cdot Z_i^2)}{\sum m_i} \right) \cdot \left[\frac{23375.556}{D(T)} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \rho^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.12})$$

La densidad se puede calcular con la siguiente ecuación, donde T es la temperatura en grados centígrados.

$$\rho = 1.00157 - 1.56096 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2.69491 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (\text{Ec.13})$$

$$a = 1 + 1.5 * (I)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.14})$$

$$b = 6.72817 - \frac{348.662}{T} - 0.971307 \text{LN}(T) \quad (\text{Ec.15})$$

$$c = \frac{40.5016}{T} - 0.721404 + 0.103915 \text{LN}(T) \quad (\text{Ec.16})$$

$$d = 233.76 + \frac{5321}{T} - 0.9297 * T + 0.001417 * T^2 - 8.292 * 10^{-7} * T^3 \quad (\text{Ec.17})$$

3.1.5. Numero de membranas

Para calcular el número de membranas, es necesario calcular la variación de flujo, el flujo total en con el que se trabaja y el flujo con el que trabaja la membrana.

$$N = \frac{Q_p}{J * A_m} \quad (\text{Ec.18})$$

Donde:

Q_p es el flujo permeado

$A_m = \text{area de la membrana}$

$J = \text{es el flujo específico m/d}$

$$J = \frac{Q_p}{A_m} \quad (\text{Ec.19})$$

3.2. Tratamiento de la salmuera

Para el tratamiento de la salmuera producida por el proceso de osmosis inversa se proponen dos opciones las cuales son:

3.2.1. Destilación solar

Para poder realizar los cálculos es necesario estimar el factor de transferencia de masa por vaporización, con lo que se calcula la masa de vapor que se obtendrá con las condiciones presentes en el lugar seleccionado.

El aire en la superficie está saturado y, por lo tanto, la presión de vapor en esa superficie es simplemente la presión de saturación del agua a la temperatura superficial. La presión de vapor del aire lejos de la superficie del agua es

$$P_{V,\infty} = \Phi * p_{\text{sat a } \infty} \quad (\text{Ec.20})$$

Densidad en la superficie

Si se considera al vapor de agua y al aire como gases ideales y se observa que la presión atmosférica total es la suma de las presiones del vapor y del aire seco, se determina que las densidades del vapor de agua, del aire seco y de su mezcla, en la interfase agua-aire y lejos de la superficie, son:

$$\rho_{v,s} = \frac{P_{v,s}}{R_v T_s} \quad (\text{Ec.21})$$

$$\rho_{a,s} = \frac{P_{a,s}}{R_a T_s} \quad (\text{Ec.22})$$

$$\rho_s = \rho_{v,s} + \rho_{a,s} \quad (\text{Ec.23})$$

Densidad lejos de la superficie

$$\rho_{v,\infty} = \frac{P_{v,\infty}}{R_v T_\infty} \quad (\text{Ec.24})$$

$$\rho_{a,\infty} = \frac{P_{a,\infty}}{R_a T_\infty} \quad (\text{Ec.25})$$

$$\rho_\infty = \rho_{v,\infty} + \rho_{a,\infty} \quad (\text{Ec.26})$$

Al identificar que éste es un problema de convección natural con superficie horizontal caliente viendo hacia arriba, se determina el número de Nusselt, el cual es número adimensional que permite medir es la relación entre la transferencia de calor por convección y por conducción a través de la misma capa de fluido (Çengel, 2011).

$$NU = 0.54 * (GR * PR)^{\frac{1}{4}}; \quad 10^4 < GR, PR < 10^7 \quad (\text{Ec.27})$$

$$Sh = 0.59 * (GR * Sc)^{\frac{1}{4}}; \quad 10^5 < GR, Sc < 10^9 \quad (\text{Ec.28})$$

$$NU = 0.15 * (GR * PR)^{\frac{1}{4}}; \quad 10^7 < GR, PR < 10^{11} \quad (\text{Ec.29})$$

$$Sh = 0.1 * (GR * Sc)^{\frac{1}{3}}; \quad 10^9 < GR, Sc < 10^{13} \quad (\text{Ec.30})$$

Debido a que no es una mezcla homogénea, se emplea el número de Grashof, que es un número adimensional que representa la razón de la fuerza de flotación a la fuerza viscosa (Çengel, 2011), y se calcula de la siguiente manera

$$GR = \frac{g * (\rho_\infty - \rho_s) L_c^3}{\rho * \nabla_c^2} \quad (\text{Ec.31})$$

el coeficiente de transferencia de calor por convección es

$$h_{conv} = \frac{NU * k}{L_c} \quad (\text{Ec.32})$$

La razón de la transferencia de calor se define como

$$H_{conv} = h_{conv} * A_s * (T_s - T_\infty) \quad (\text{Ec.33})$$

$$h_{masa} = \frac{Sh * D_{H_2O-AIRE}}{L_c} \quad (\text{Ec.34})$$

La longitud característica L_c se define como el área A_s sobre el perímetro p_e

$$L_C = \frac{A_s}{pe} \quad (\text{Ec.35})$$

La difusividad de la masa de vapor de agua en el aire se calcula a la temperatura promedio

$$D_{\text{H}_2\text{O}-\text{AIRE}} = 1.87 * 10^{-10} * \frac{T^{2.072}}{P} \quad (\text{Ec.36})$$

El número de Schmidt es

$$S_C = \frac{V_C}{D_{\text{H}_2\text{O}-\text{AIRE}}} \quad (\text{Ec.37})$$

La razón de transferencia de masa de evaporación se calcula

$$\dot{m}_v = h_{\text{masa}} * A_s * (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (\text{Ec.38})$$

Factor de transferencia de masa condensación

Para el cálculo del área necesaria para poder condensar la masa de vapor se usarán correlaciones para obtener el coeficiente de transferencia de condensación. Se usara la ecuación propuesta por (Zhang et al., 2018)

$$h_t = 0.296 \left[\frac{g * \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h_{fg}}{\mu (T_{\text{sat}} - T_w) D} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Ec.39})$$

$$H = h_t * A * (T_b - T_i) \quad (\text{Ec.40})$$

La razón de transferencia de masa de condensación se calcula mediante

$$\dot{m} = \frac{H}{h_{fg}} \quad (\text{Ec.41})$$

Para tener mejores cálculos se usaran el calor latente de evaporización modificado que se define como (Çengel, 2011)

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68 * c_p * (T_{\text{sat}} - T_s) \quad (\text{Ec.42})$$

3.2.2. Evaporación de la salmuera

Como otra opción para el tratamiento de la salmuera se propone la evaporación de esta con una caldera alimentada de biomasa. Para esto es necesario calcular el régimen de ebullición nucleada y la razón de la transferencia de calor, que depende fuertemente de la naturaleza de la nucleación (el número de sitios activos de nucleación sobre la superficie, la rapidez de la formación de burbujas en cada sitio, etc.), lo cual es difícil de predecir. El tipo y la condición de la superficie calentada también afectan la transferencia de calor. Estas complicaciones dificultan desarrollar relaciones teóricas para la transferencia de calor en el régimen de ebullición nucleada y se necesita apoyar en relaciones basadas en datos

experimentales. La correlación que se usa con mayor amplitud para el flujo de calor en el régimen de ebullición nucleada fue propuesta en 1952 por Rohsenow (Çengel, 2011) y se expresa como:

$$\dot{H}_{\text{nucleada}} = \mu_1 h_{\text{fg}} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{c_p(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{\text{sf}} h_{\text{fg}} \text{Pr}_l^n} \right]^3 \quad (\text{Ec.44})$$

El calor total se expresa como

$$\dot{H}_{\text{total}} = \dot{H}_{\text{nucleada}} * \text{area} \quad (\text{Ec.45})$$

La razón de transferencia de masa

$$\dot{m} = \frac{\dot{H}_{\text{total}}}{h_{\text{fg a } 100^\circ\text{C}}} \quad (\text{Ec.46})$$

El tiempo de evaporación se puede calcular como

$$\Delta t = \frac{m_{\text{h}_2\text{O}}}{\dot{m}} \quad (\text{Ec.47})$$

El número de Rayleigh es un número que está asociado a la transferencia de calor en el interior del fluido y se calcula como:

$$R_A = G_{\text{rl}} P_{\text{rl}} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\nu_\alpha} \quad (\text{Ec.48})$$

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (\text{Ec.49})$$

El número de Nusselt

$$N_u = 0.27 R_A^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Ec.50})$$

$$h = \frac{N_u k}{L} \quad (\text{Ec.51})$$

La razón de transferencia de calor

$$\dot{H} = h_t * A * (T_b - T_i) \quad (\text{Ec.52})$$

$$H = m c_p \Delta T \quad (\text{Ec.53})$$

$$\Delta t = \frac{H}{\dot{H}} \quad (\text{Ec.54})$$

Para la selección de caldera es necesario el cálculo de la potencia requerida, el cual se define como la suma del calor latente y el calor sensible.

$$\text{pot} = \frac{H_{\text{requerido}}}{\eta_{\text{caldera}}} \quad (\text{Ec.55})$$

3.3. Análisis exergético

Aunque la osmosis inversa está bien establecida, es necesario impulsar el estado de la técnica, y hacer el funcionamiento de estas plantas más eficiente. Una

comparación de la operación ideal y real de las tecnologías actuales de desalinización demostraron que el coste energético real de la desalinización es de hasta 20 veces el coste idealizado. Esto corresponde a una eficiencia de segunda ley tan baja como 5%, y señala que hay tremendas oportunidades en las plantas de osmosis inversa para mejoras. El primer paso en cualquier mejora o proyecto de mejora es el diagnóstico, y la herramienta de diagnóstico más poderosa en termodinámica es el análisis de segunda ley. Tal análisis ayuda a determinar los sitios de las más altas generación de entropía y, por tanto, destrucción de exergía, e identificar los componentes responsables de las mayores pérdidas del sistema.

3.3.1. Exergía de un flujo

Se calcula el máximo trabajo útil que se puede obtener de un flujo como:

$$\Psi = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (\text{Ec.55})$$

$$\dot{X} = m\Psi \quad (\text{Ec.56})$$

3.3.2. Exergía de entrada

Se define como el trabajo empleado en el proceso.

$$X_{in} = W_{\text{electrico}} = \frac{W_{\text{electrico}}}{\text{numero de horas}} \quad (\text{Ec.57})$$

3.3.3. Destrucción de exergía

Debido a que la exergía destruida no puede ser negativa. De hecho, la exergía destruida no es una propiedad, como la exergía destruida debe ser positiva en todo proceso real y esta de calcula de la siguiente manera.

$$\dot{W}_{\min} = X_{\text{salida de salmuera}} - \dot{X}_{\text{entrada de agua salada}} \quad (\text{Ec.58})$$

$$X_{\text{total destruccion}} = X_{in} - \dot{W}_{\min} \quad (\text{Ec.59})$$

$$\Delta \dot{X}_{\text{bombas}} = \Delta \dot{X}_{\text{bomba de baja}} + \Delta \dot{X}_{\text{bomba de alta}} \quad (\text{Ec.60})$$

$$\eta_{\text{bombas}} = \frac{\Delta \dot{X}_{\text{bombas}}}{\dot{W}_{\min}} \quad (\text{Ec.61})$$

Para poder aplicar las ecuaciones planteada con anterioridad es necesario conocer la entalpia y la entropía. Estas propiedades serán calculadas mediante el software Aspen Plus® el cual fomenta el desempeño de procesos químicos usando el mejor software de simulación en su clase para las industrias de químicos y farmacéutica. Esta poderosa tecnología de modelado permite la optimización de la cantidad de material procesado, la calidad del producto y en uso de energía en operaciones por lote, continuas y combinadas. Para poder calcular estas propiedades en una sustancia que contiene varios elementos como lo es el agua

Si se necesita un tratamiento riguroso de electrolitos para modelar muchos sistemas. Con las capacidades de electrolitos de Aspen Plus, puede modelar:

- Soluciones de agua ácida: agua que contiene H₂S, NH₃, CO₂, HCN disueltos, a veces con disolventes adicionales.
- Aminas acuosas para edulcorar gases - Agua que contiene DGA, MEA, DEA, o MDEA para la eliminación de H₂S y CO₂.
- Ácidos o bases acuosas: HCl, HBr, H₂SO₄, H₃PO₄, HNO₃, HF, NaOH, KOH, y otros, en solución acuosa, a veces con disolventes adicionales.
- Soluciones salinas: NaCl, KCl, Na₂SO₄, CaSO₄, CaCO₃ en solución, a veces con participación

En Aspen Plus, un sistema de electrolitos se puede definir como uno en el que algunos de las especies moleculares se disocian parcial o completamente en iones en un líquido disolvente y/o algunas de las especies moleculares precipitan en forma de sales. Estas reacciones de disociación y precipitación ocurren lo suficientemente rápido como para que las reacciones pueden considerarse que está en equilibrio químico. Las reacciones que describen este comportamiento se denominan a menudo química de la solución. En Aspen Plus, la química de la solución a menudo se denomina simplemente Química. La química de la solución tiene un gran impacto en la simulación de sistemas de electrolitos. Para sistemas sin electrolitos, las reacciones químicas generalmente ocurren solo en reactores. En Aspen Plus, todos los modelos de operación de la unidad pueden manejar reacciones con electrolitos. La química de la solución también afecta los cálculos de las propiedades físicas y los cálculos de equilibrio de fases. La presencia de iones en la fase líquida provoca un comportamiento termodinámico altamente no ideal. Aspen Plus ofrece servicios especializados, modelos termodinámicos y datos incorporados para representar el comportamiento no ideal de componentes en fase líquida para obtener resultados precisos (*Modeling Processes with Electrolytes Aspen Plus 7*, 1981).

- Para empezar en análisis de electrolitos en Aspen Plus, lo primero es abrir el programa Aspen Plus en el menú dar nuevo y dar click en "electrolytes with Metric Units"

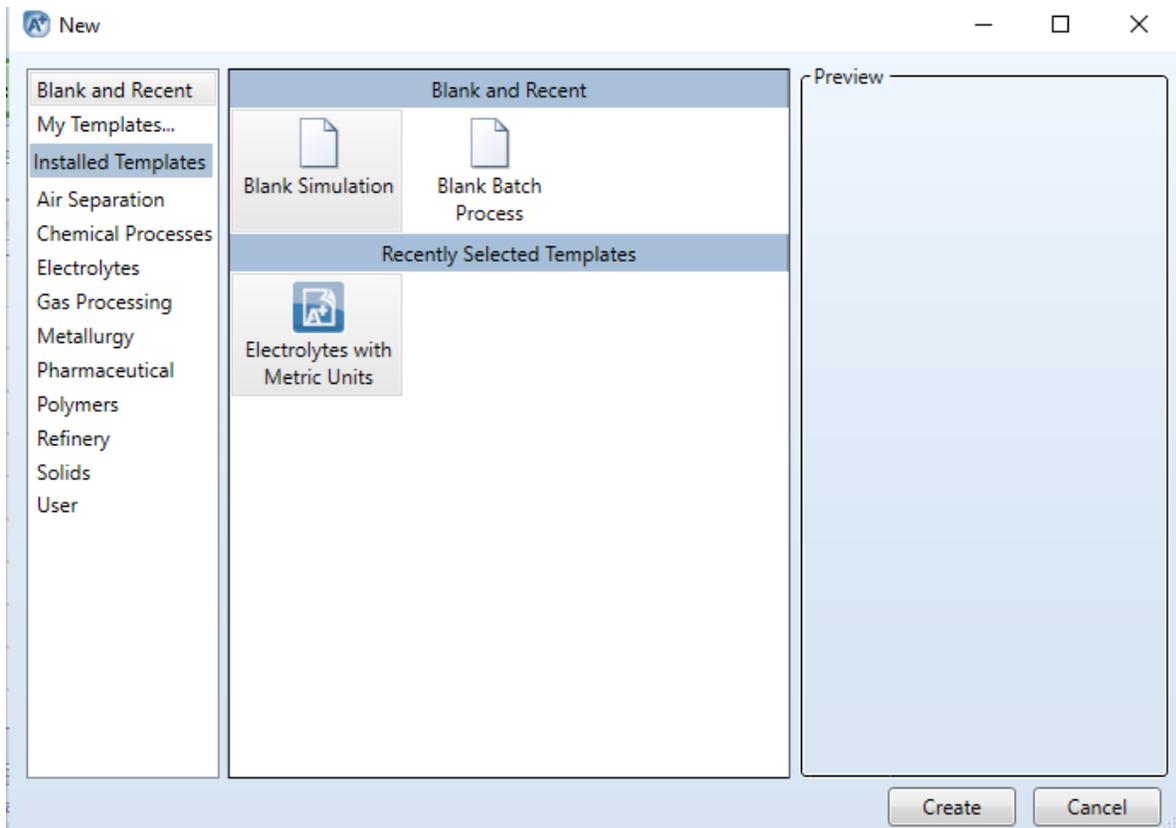


Figura 15. Inicio Aspen plus

- En la selección de componentes es necesario agregar los elementos por los cuales está compuesto nuestra sustancia, los aniones y cationes.

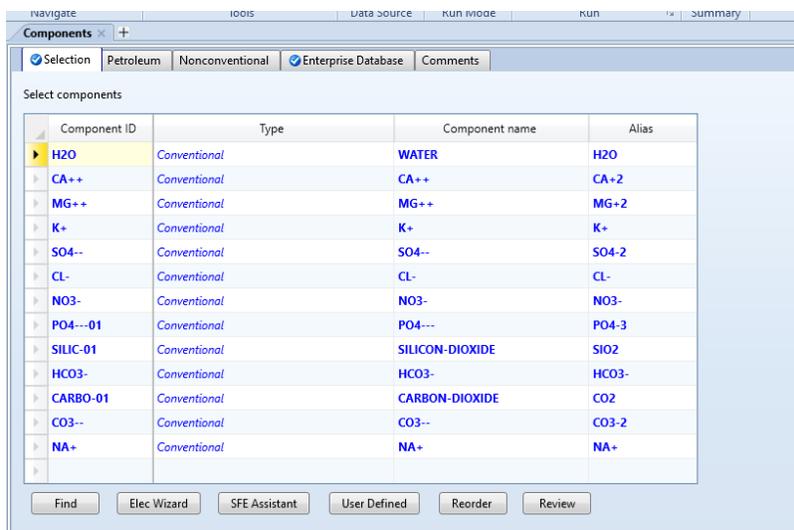


Figura 16. Aniones y cationes agregados Aspen plus.

- Se selecciona el método a usar el cual será “ELECNRTL”

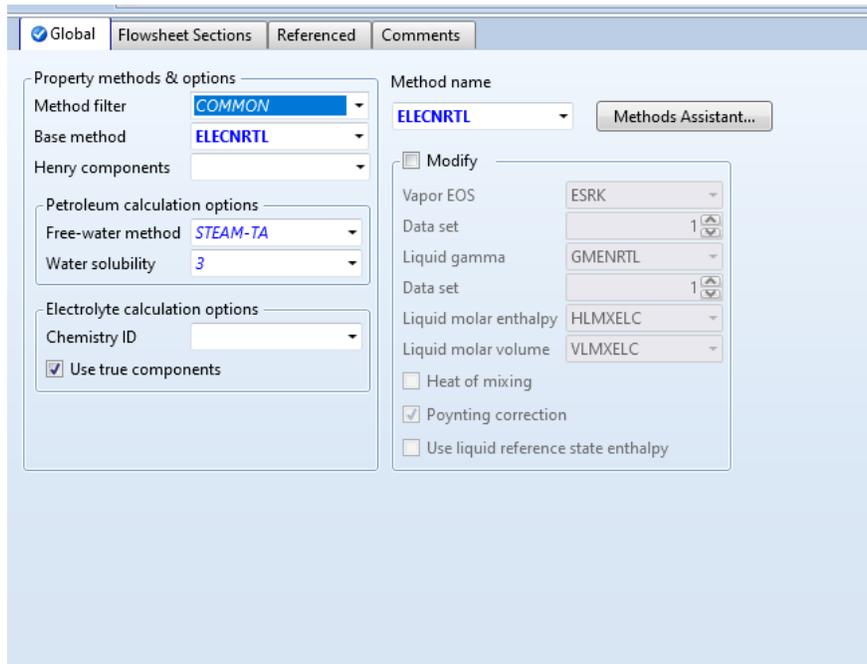


Figura 17. Método usado en Aspen plus

- Se agrega una caldera y los flujos de entrada y salida en la caldera se configuran las condiciones a las que se desean llegar y en el flujo de entrada las condiciones iniciales del flujo.

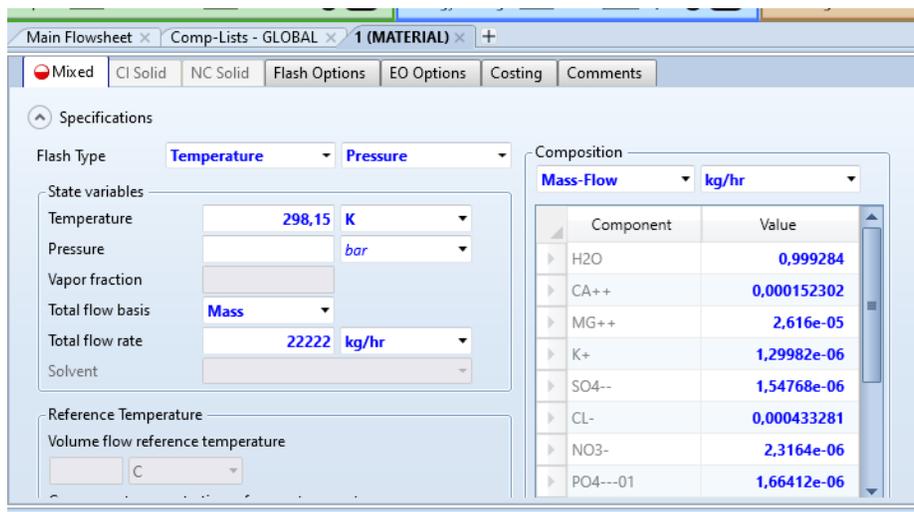


Figura 18. Determinación de estado muerto Aspen plus.

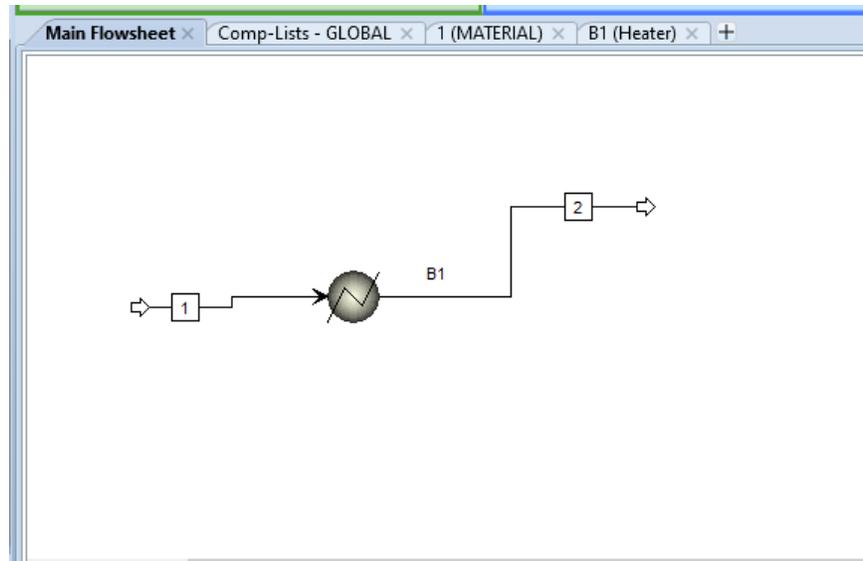


Figura 19. Diagrama de flujo principal Aspen plus.

The screenshot shows the 'Specifications' tab for a heater unit. The 'Flash Type' is set to 'Temperature'. Below it, there are several input fields and dropdown menus for defining the final state of the flash:

- Flash Type:** Temperature (selected), Pressure
- Temperature:** [Empty field], C (dropdown)
- Temperature change:** [Empty field], C (dropdown)
- Degrees of superheating:** [Empty field], C (dropdown)
- Degrees of subcooling:** [Empty field], C (dropdown)
- Pressure:** [Empty field], bar (dropdown)
- Duty:** [Empty field], Gcal/hr (dropdown)
- Vapor fraction:** [Empty field]
- Pressure drop correlation parameter:** [Empty field]

At the bottom, there is a checkbox labeled 'Always calculate pressure drop correlation parameter' which is currently unchecked.

Figura 20. Especificación de estado final Aspen plus.

3.4. Paneles solares

Como la finalidad de este proyecto es el diseño de una planta autosostenible la energía necesaria será suministrada mediante la energía solar para esto es necesario la selección y el cálculo de paneles solares y el inversor para poder alimentar y garantizar el buen funcionamiento de los elementos eléctricos de la planta.

Los módulos o paneles fotovoltaicos están formados por la interconexión de células solares dispuestas en serie y/o en paralelo de manera que la tensión y corriente que finalmente proporcione el panel se ajusta al valor requerido.

$$N_{mod} = \frac{C_{ed}}{P_{mp} * HSP_{crit} * PR} \quad (\text{Ec.62})$$

Donde C_{ed} es el consumo diario de energía

P_{mp} : potencia pico del modulo

HSP_{crit} : es el valor pico de las horas de sol

PR: coeficiente de pérdidas que será la sumatoria de todas las perdidas instaladas del panel. Entre estas tenemos:

- a) Pérdidas debidas a la acumulación de suciedad en los módulos: es una condición normal debido al polvo del lugar donde se ubicarán los paneles, ya que no se puede hacer una limpieza las 24 horas. No obstante, se recomienda su limpieza regular, por lo que en este caso las pérdidas no deben superar el 3%.
- b) Pérdidas por sombras: Las pérdidas por el sombreado parcial de los generadores fotovoltaicos que penalizan su producción eléctrica, las cuales se pueden estimar en torno al 2%.
- c) Pérdidas por degradación de los módulos: Estas pérdidas son atribuidas al proceso natural de envejecimiento de todas las células de silicio debido a que estos trabajan en la intemperie, un valor de perdida por degradación no puede ser mayor al 1%.
- d) Pérdidas eléctricas: todas las instalaciones eléctricas, conexiones del módulo y todas las demás conexiones de los componentes de la instalación de los paneles fotovoltaicos se deben realizar según el Pliego de Condiciones Técnicas del IDAE, donde se indica que la caída de tensión no podrá superar el 1,5% por tanto el concepto de perdida eléctrica se tomara por 1.5% (IDAE Instituto para la Diversificación, n.d.).
- e) Pérdidas por reflectancia: Este tipo de pérdidas, que hacen referencia a los efectos angulares de la reflexión en los módulos, fueron estimadas por la Universidad de Ginebra y deben considerarse en un 2,9% (Daniel Rivas Martinez, Sánchez Martin Darío, & de Jesús Velázquez Vázquez, n.d.).

Como la eficiencia de los paneles disminuye si la temperatura de estos es superior a 25°C en la superficie del panel. Al ser un elemento expuesto a la radiación solar de manera continuada es necesario que exista una buena ventilación tanto por la superficie expuesta al sol como por la parte posterior de los módulos. No obstante, incluso con buena ventilación, se produce un incremento de temperatura de la superficie de los módulos con respecto a la temperatura ambiente exterior.

Para el cálculo del factor que considera las pérdidas por incremento de la temperatura del panel (PT), se suele emplear la siguiente expresión:

$$P_t = K_t * (T_c - 25) \quad (\text{Ec.63})$$

Debido a que la corriente proporcionada por el panel no se puede usar directamente para alimentar los elementos eléctricos de la planta es necesario la implementación de un inversor el cual es un dispositivo electrónico cuya función es cambiar el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje de salida de corriente alterna. Es decir, transforma los 12v o 24v de la corriente de una batería (corriente continua) a 220v (corriente alterna) como la que tenemos en una vivienda.

Los inversores de corriente se utilizan en gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación, hasta en grandes aplicaciones industriales estos tienen un rendimiento que va del 90 al 94 %.

$$e_{\text{panel}} * \eta_{\text{inversor}} = e_{\text{Ac}} \quad (\text{Ec.64})$$

Para la selección del regulador de carga es necesario calcular cuál será la máxima corriente que deberá soportar, tanto en la entrada como a la salida del propio regulador.

$$c_{\text{er}} = 1.25 * c_{\text{sc}} \quad (\text{Ec.65})$$

3.4.1. Dimensionado del inversor de corriente

El inversor permite transformar la corriente directa producida en el sistema PV a corriente alterna y útil para la bomba del sistema de aireación por microburbujas. Este dispositivo se conecta entre la salida del regulador de corriente y el sistema de microburbujas. La elección del inversor se realiza con base a la potencia eléctrica máxima requerida.

4. RESULTADOS

4.1. Osmosis inversa

Con el sitio seleccionado y la población se puede calcular los flujos estimados teniendo en cuenta que las bombas que se usaran para la planta de desalinización trabajarán con energía solar. Para ello, es necesario tener en cuenta que la planta solo trabajará 6 horas al día; con esto, se estimaron los flujos aplicando las ecuaciones 2-3.

Tabla 6. Flujos de planta de Osmosis inversa

		unidades
consumo mensual	12667	m ³
consumo diario	423	m ³
horas pico sol	6	H
flujo de entrada QA	76	m ³ /H
flujo permeado Qp	71,288	m ³ /H
flujo salmuera QC	4,712	m ³ /H
r	0,938	

La configuración de la planta se hará en dos etapas con un porcentaje de recuperación de 0.75 en cada una, para poder tener un factor de recuperación de 0.938 total en la planta. Esto se debe para no poner una gran carga en la membrana debido a que el factor de recuperación afecta la concentración de salida.

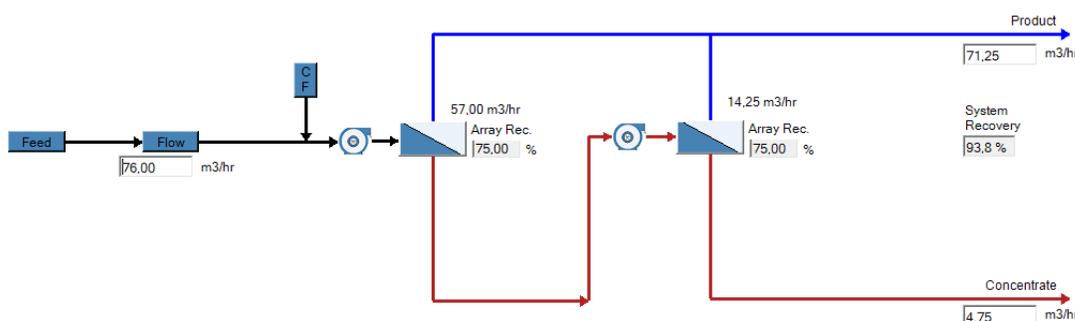


Figura 21. Diagrama Osmosis inversa

con los flujos y los factores de recuperación es posible el cálculo de las concentraciones en cada una de las etapas de la planta de osmosis inversa usando las ecuaciones 4-6

Tabla 7. Concentraciones de flujos fase 1

	CA	fracción másica	%	CP	CC
Ca ²⁺	338,7	0,0003387	24,266	71,25	1016,1
Mg ²⁺	35,28	0,00003528	2,527	0	105,84
Na ⁺	114,33	0,00011433	8,191	0	342,99
K ⁺	2,82	0,00000282	0,202	- 2,4931E- 16	8,46
SO ₄ ²⁻	8,25	0,00000825	0,591	0	24,75
Cl ⁻	852,4	0,0008524	61,071	- 1,2765E- 13	2557,2
NO ₃ ⁻	7,97	0,00000797	0,5710	- 9,9725E- 16	23,91
PO ₄ ³⁻	8,77	0,00000877	0,628	0	26,31
HCO ₃ ⁻	12,53	0,00001253	0,897	0	37,59
CO ₃ ²⁻	0,03	0,00000003	0,00214	0	0,09
SiO ₂	14,11	0,00001411	1,0109	0	42,33
CO ₂	0,55	0,00000055	0,0394	0	1,65
suma	1395,74				4187,22

Tabla 8. Concentraciones flujos fase 2

	CA	fracción másica	%	CP	CC
Ca ²⁺	1016,1	0,0010161	24,266	0	3048,3
Mg ²⁺	105,84	0,00010584	2,527	- 1,5956E- 14	317,52
Na ⁺	342,99	0,00034299	8,191	0	1028,97
K ⁺	8,46	0,00000846	0,202	0	25,38
SO ₄ ²⁻	24,75	0,00002475	0,591	0	74,25
Cl ⁻	2557,2	0,0025572	61,071	0	7671,6
NO ₃ ⁻	23,91	0,00002391	0,571	0	71,73

PO ₄ ³⁻	26,31	0,00002631	0,628	0	78,93
HCO ₃ ⁻	37,59	0,00003759	0,897	0	112,77
CO ₃ ²⁻	0,09	0,00000009	0,00214	-7,791E-18	0,27
SiO ₂	42,33	0,00004233	1,0109	0	126,99
CO ₂	1,65	0,00000165	0,0394	0	4,95
suma	4187,22	0,00418722	100		12561,66

Con las concentraciones estimadas en las etapas de la planta de osmosis inversa es posible el cálculo de la presión osmótica utilizando las ecuaciones de la 7-17, la cual es de gran importancia para el proceso de osmosis inversa. Debido a que la presión aplicada debe ser mayor a la presión osmótica para que se dé el fenómeno de osmosis inversa multiplicando por 1,5 la presión osmótica calculada para poder garantizar que se el proceso de osmosis inversa.

Tabla 9. Presiones osmosis inversa

fase 1	
presión osmótica(bar) r	presión osmótica (bar)f
3	1
4,5	1,5
fase 2	
presión osmótica(bar) r	presión osmótica (bar)f
9	3
13,5	4,5

La empresa LG Chem fabrica la línea completa membranas de ósmosis inversa para agua de mar y agua salobre NanoH₂O™ basadas en innovadores nanocompuestos de tecnología de película delgada. Es una empresa que está en constante evolución y han tenido un gran éxito en grandes proyectos de desalinización y continuar fortaleciendo el liderazgo en el mercado para la ósmosis inversa del agua de mar. Con esto han demostrado ser una marca de buena calidad en membranas de agua salobre, con lo que se selecciona la membrana que pueda soportar la máxima presión osmótica y la de mayor área. Buscando en su catálogo podemos encontrar entre la membrana LG BW 400 AFR G2, la cual es una membrana para agua salina que soporta las condiciones de operación establecidas (“LG BW 400 AFR G2 | Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) Membranes | Products | LG Water Solutions,” n.d.).

Tabla 10. Especificaciones de membrana LG BW 400 AFR G2

Especificaciones del producto	
Área activa de la membrana	400 ft ² (37m ²)
Razón de flujo permeado	11500 GPD (43,5 m ³ /d)
Rechazo de sales	99,7%
Mínimo rechazo de sales	99,6%

Tabla 11. Condiciones de operación membrana LG BW 400 AFR G2

Especificaciones de operación	
Máxima presión aplicada	600 psi (41bar)
Máxima concentración de cloro	< 0,10 ppm
Máxima temperatura de operación	45°C (113°F)
Máxima turbidez de agua de entrada	1,0 NTU
máximo flujo de entrada	79 GPM (17m ³ /h)
Máxima caída de presión por cada elemento	15 psi (1bar)

Con la membrana seleccionada y los flujos de operación se calculará el número de membranas y los tubos necesarios en la planta de osmosis inversa utilizando las ecuaciones 18-19.

Tabla 12. Numero de membrana y tubos de la planta desalinizadora

fase 1	
numero de membrana	4,5
numero de tubos	0,64
fase 2	
numero de membrana	1,12
numero de tubos	0,16

Para la selección de la bomba es necesario suplir el flujo para la alimentación de la planta el cual es 76 m³/h, para la bomba de profundidad es necesario bombear el agua de un pozo de 13 m de profundidad más las perdidas en la tubería lo que requiere una cabeza de 18.5m.

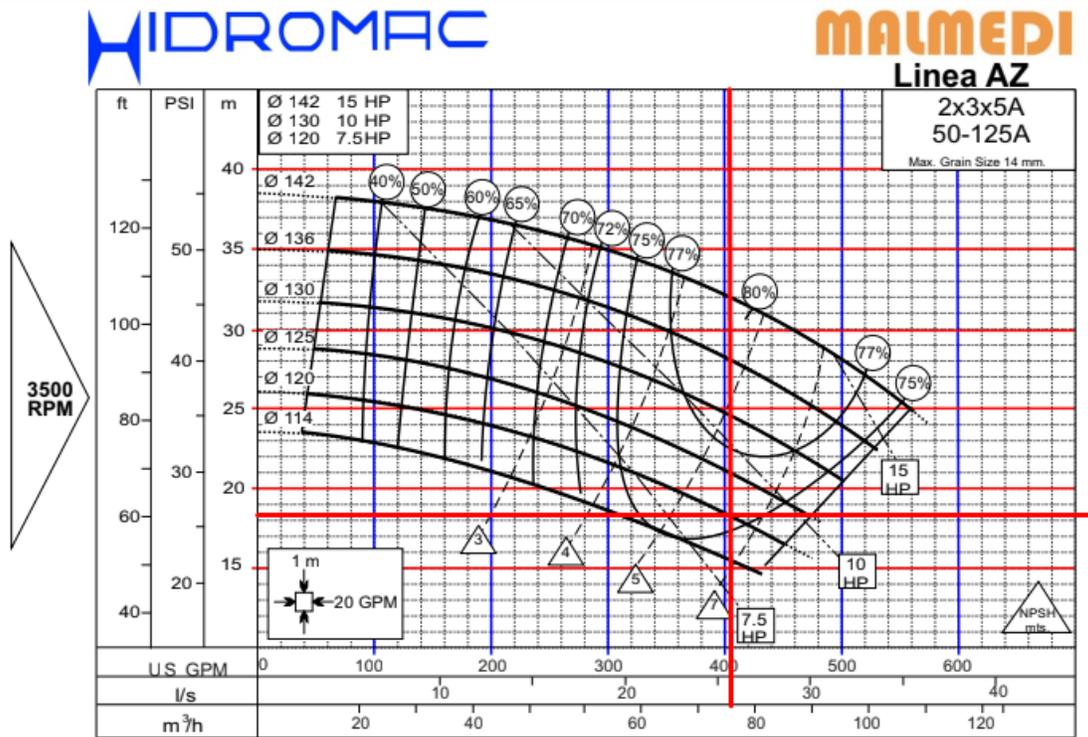


Figura 22. curva característica de bomba MALMEDI LINEA AZ 2x3x5A, 50-125A

Según la figura 22 la bomba MALMEDI LINEA AZ 2x3x5A, 50-125° Impeller de 120 mm, Eficiencia del 76%, 76 m³/h, cabeza de 18.5 m, motor de 10 HP.

Para la bomba de alta presión se seleccionará D/DG85-67x9 o una bomba aurora 2x4x11 – 3550 rpm – 87 HP que cumplen con las características necesarias.

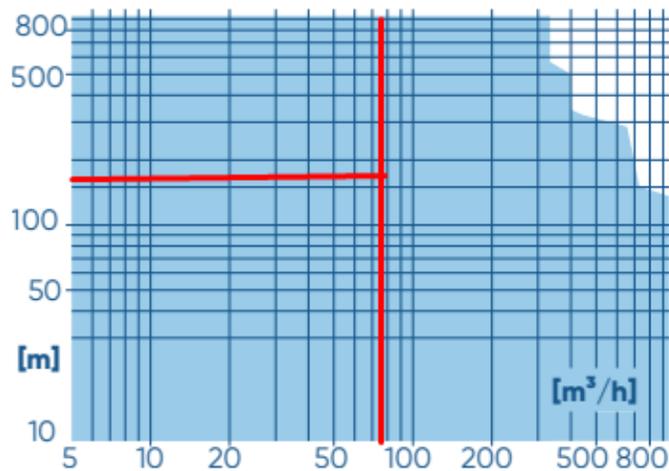


Figura 23. Curva característica bomba múltiple etapa D.

Con los flujos y las presiones es posible tener las condiciones de operación de la planta de osmosis inversa. Con esto es posible el cálculo de propiedades termodinámicas como entalpia y entropía para el cálculo exergético.

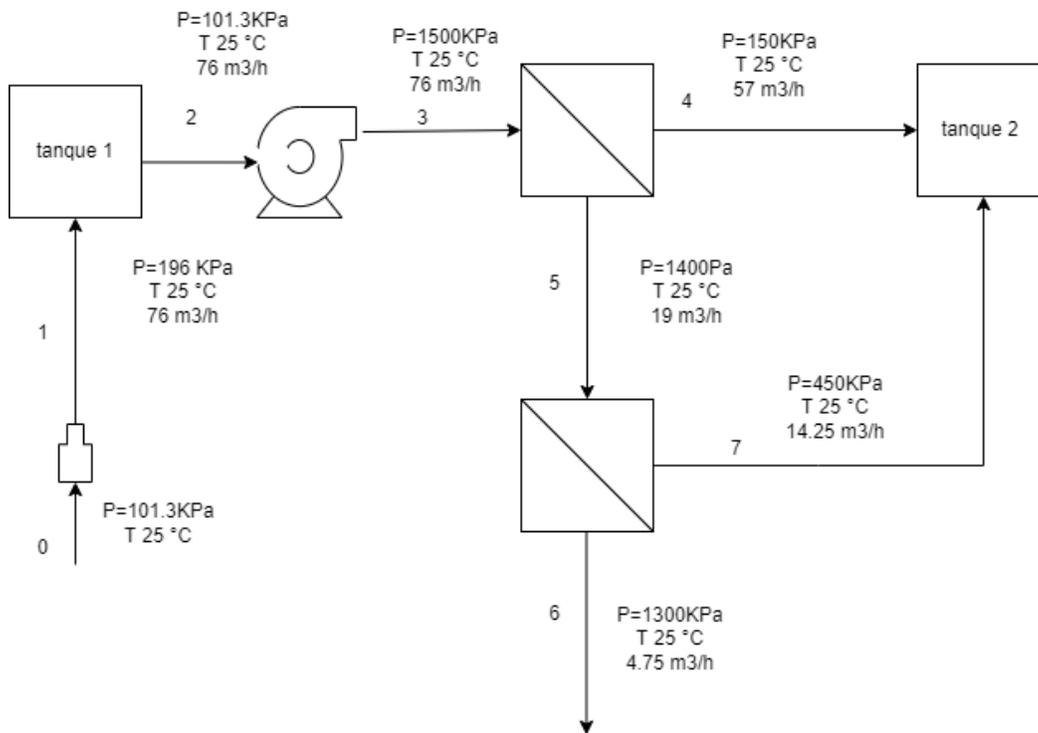


Figura 24. Diagrama osmosis inversa

4.2. Calculo exergético

Con los flujos estimado y las condiciones de la planta, se realizarán los cálculos usando el programa Aspen Plus® y las ecuaciones 55 y 56. Para poder calcular las propiedades termodinámicas, se emplea como usando como condiciones de estado muerto una temperatura y presión de 25°C y 1 atmósfera.

Tabla 13. Requerimiento energético bombas

potencia bomba de profundidad	10	hp	7.48	kW
potencia bomba de alta	56,5	hp	42.13	kW

Tabla 14. Calculo exergético de cada flujo

localización	temperatura (k)	presión (kPa)	salinidad(ppm)	flujo masico kg/s	exergía especifica(kJ/kg)	flujo exergético(kW)
0	298,15	101,3	1395,74	2,11	0	0
1	298,15	196	1395,74	2,11	0,112	0,238
2	298,15	101,3	1395,74	2,11	0	0
3	298,15	1500	1395,74	2,11	9,102	19,216
4	298,15	150	71,25	1,583	-7,767	-12,298
5	298,15	1400	4187,22	0,527	23,312	12,303
6	298,15	1300	12561,66	0,131	64,312	8,485
7	298,15	450	0	0,395	1,271	0,503

Empleando las ecuaciones 57-61 se calculará la eficiencia del sistema.

Tabla 15. Resultados de análisis exergético.

Exergía de entrada(kW)	49,51
w min	9,09
w mecánico	4,32
x destruida total	29,46
Δx_{bombas}	19,45
η_{bomba} (%)	45,398

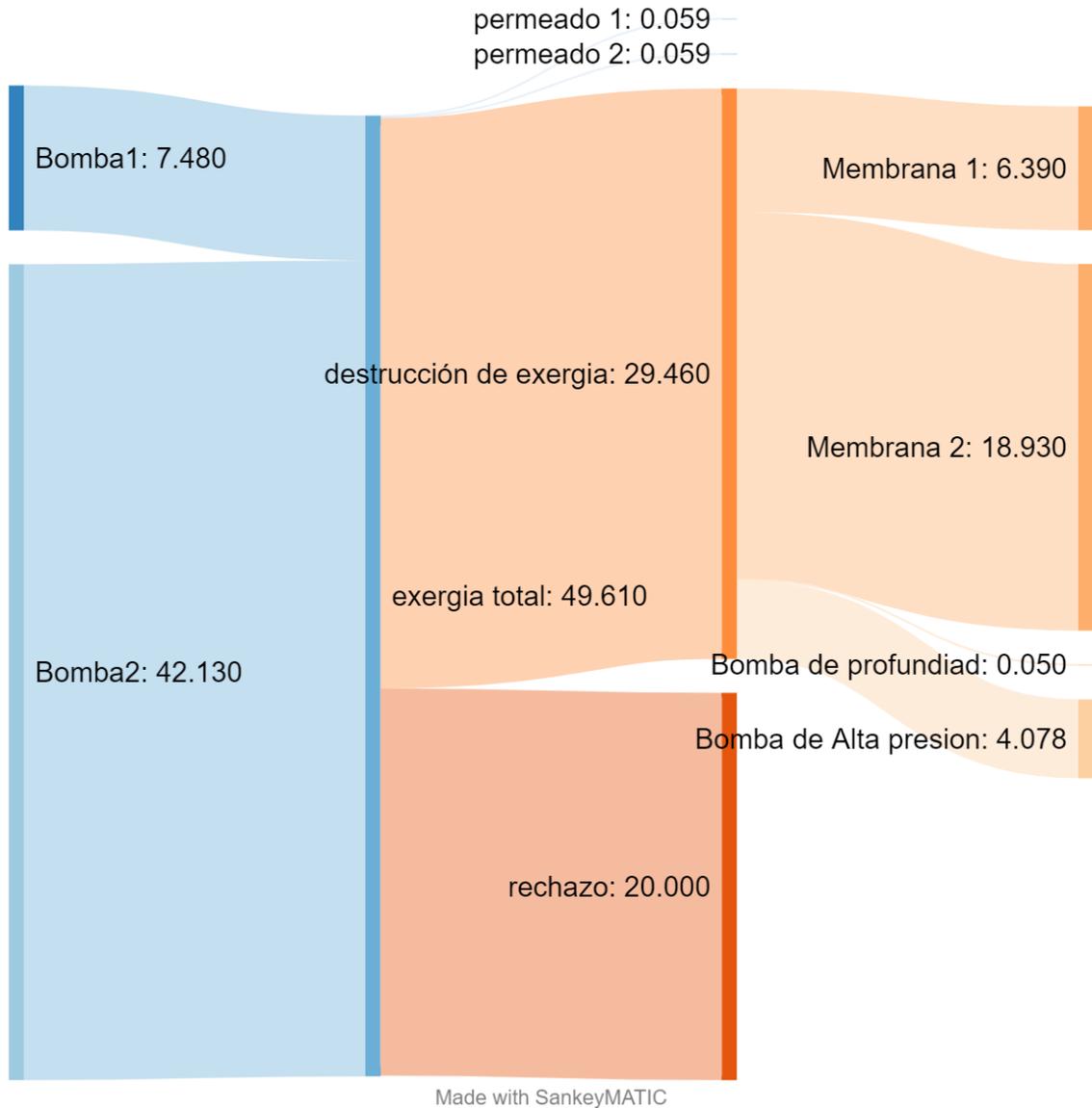


Figura 25. Diagrama de Sankey de análisis exergético

4.3. Paneles solares

Como las bombas que se emplean en la planta de osmosis inversa se alimentaran con energía solar, es necesario el cálculo de los paneles necesario para mantener el funcionamiento de la planta. En este caso se seleccionó el panel solar 540W 24V Monocristalino ATLAS, que ofrece la mejor opción para instalar la máxima potencia en el menor espacio. Gracias a sus células monocristalinas PERC de elevado rendimiento, se tiene aproximadamente un 25% más de producción de energía con respecto a un panel de 540W y con el mismo tamaño, lo que lo hace útil para zonas aisladas, conexiones a red y cualquier tipo de sistema gracias a su elevada

eficiencia. Es un panel solar de 144 células, de la empresa AutoSolar (“Panel Solar 540W 24V Monocristalino ATLAS | AutoSolar,” n.d.) .

Tabla 16. Características mecánicas del panel solar 540W 24 C monocristalino Atlas

Tipo de célula	Monocristalino (182x182 mm)
Numero de células	144
dimensiones	2279x1134x35mm
peso	29 kg
Cable	4,0 mm ² landscape: N1400mm/p 1400mm
conector	MC4 compatible

Con un régimen de trabajo y aplicando la ecuación 62 y con un régimen de trabajando 6 horas, el PR seria de 83.04% lo que se traduce en un total de 127 paneles necesarios para asegurar el funcionamiento de la planta de osmosis inversa y un área de 330 m².

4.4. Regulador

Para el cálculo de la máxima corriente de entrada al regulador (I_{Re}), que proviene directamente de los módulos fotovoltaicos, usando un factor de seguridad de 1.5, se debe seleccionar un regulador de 20 A. Para esto se emplea un regulador KW1220 (“Regulador Controlador Carga Baterías Panel Solar 20a 12/24v | MercadoLibre,” n.d.).

Tabla 17. Características reguladro KW1220

Tipo de regulador	Step down
Voltaje mínimo de salida	12V
Voltaje máximo de salida	24 V
Corriente máxima de salida	20A
Con voltaje de salida regulable	si

4.5. Inversor

Para la selección del inversor se asume un factor de seguridad del 15%, incrementando el valor de potencia a 48.76 kW. Para el cual se seleccionó el inversor MAC 70 KTL3-X MV (“Inversor Solar Ongrid 70 Kw Trifasico 277vac 480v \$ 7.288.530 en Barranquilla - Atlántico | Mebuscar Colômbia,” n.d.).

Tabla 18. Características inverter MAC 70 KTL3-X MV

Potencia máxima de operación	70kw
Potencia pico	105 kW
Tipo de onda	Onda sinusoidal
Máxima eficiencia	98,8%

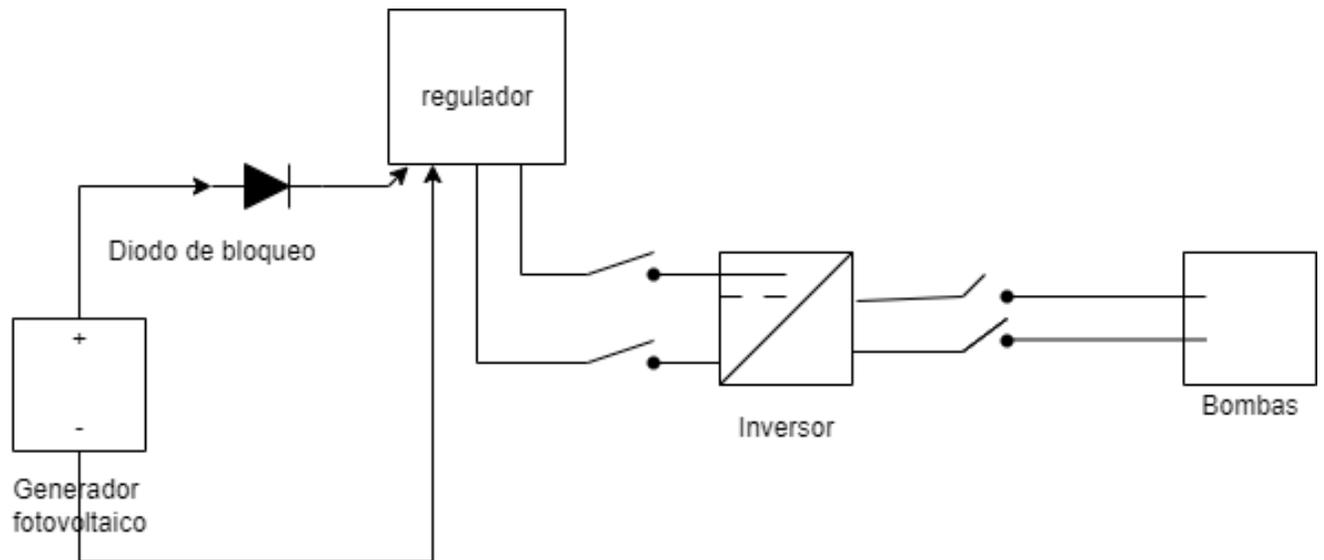


Figura 26. Diagrama sistema fotovoltaico

4.6. Tratamiento de la salmuera

Al conocer las temperaturas de un día típico y la radiación solar del día además de las propiedades del material del equipo de destilación solar, es posible estimar la temperatura del agua que se evaporará.

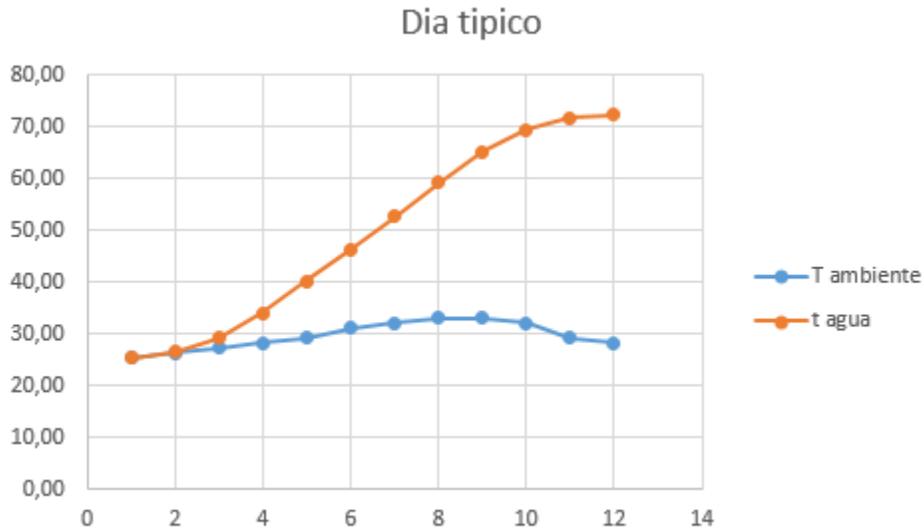


Figura 27. Temperaturas ambiental y temperatura de superficie

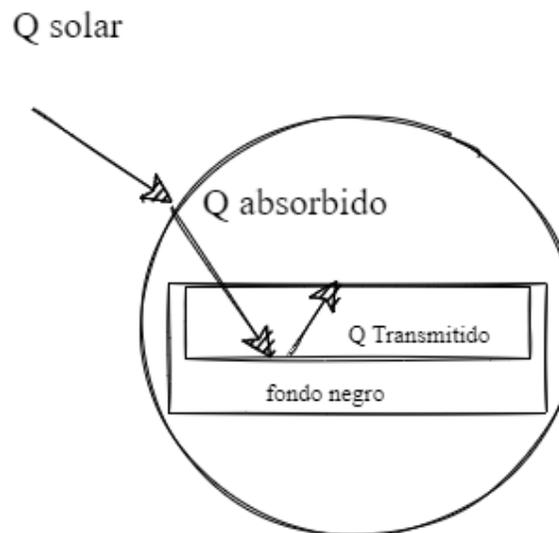


Figura 28. Diagrama transferencia destilador solar

Para poder tener un buen manejo de la salmuera producida por la planta de osmosis inversa, la cual se estimó de 28.5 m³/día, al estimar el factor de transferencia por evaporación aplicando las ecuaciones de la 20-38. Con esta información, es posible estimar el área necesaria para el evaporar la salmuera producida por la planta de desalinización de osmosis inversa.

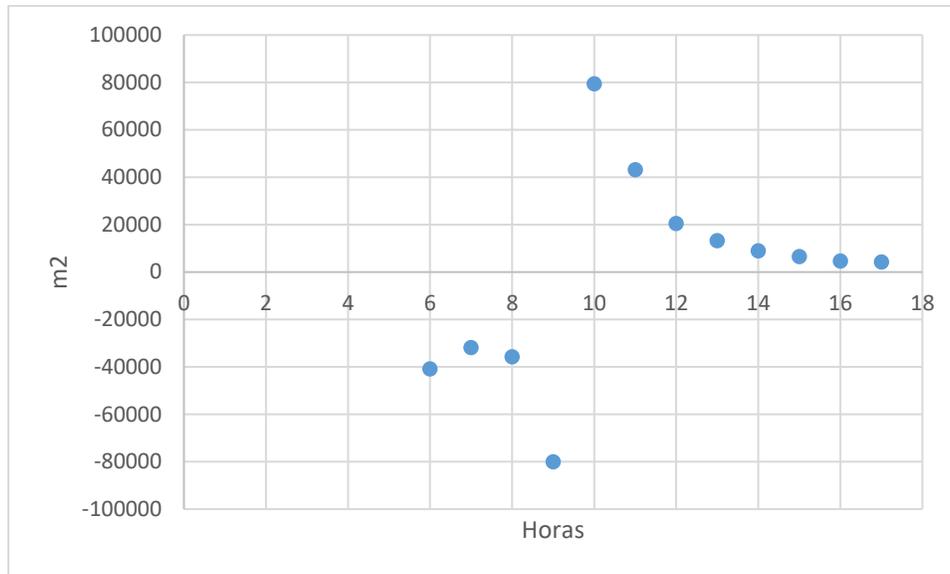


Figura 29. área necesaria para evaporar según las horas del día

Debido a la gran área requerida para la evaporación con el método de destilación solar, otra alternativa consiste en la utilización de una caldera alimentada por biomasa. Con los cálculos del calor latente y el calor sensible de las ecuaciones de 44-55, y teniendo en cuenta la entalpía de cambio de fase de la ecuación 47, se calcula un tiempo estimado de 4 horas para evaporar la masa de agua contenida en un contenedor de 5000L de salmuera, asumiendo que esta será alimentada con biomasa de poder calorífico de 20.000 kJ/kg. Esto requiere alrededor de 5.3 toneladas diarias de biomasa y 8 tanques con las dimensiones de la Figura 29, para almacenar y evaporar la salmuera.

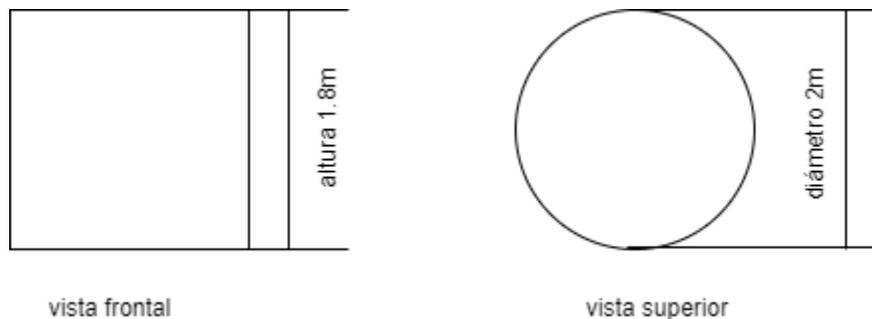


Figura 30. Medidas tanque para salmuera

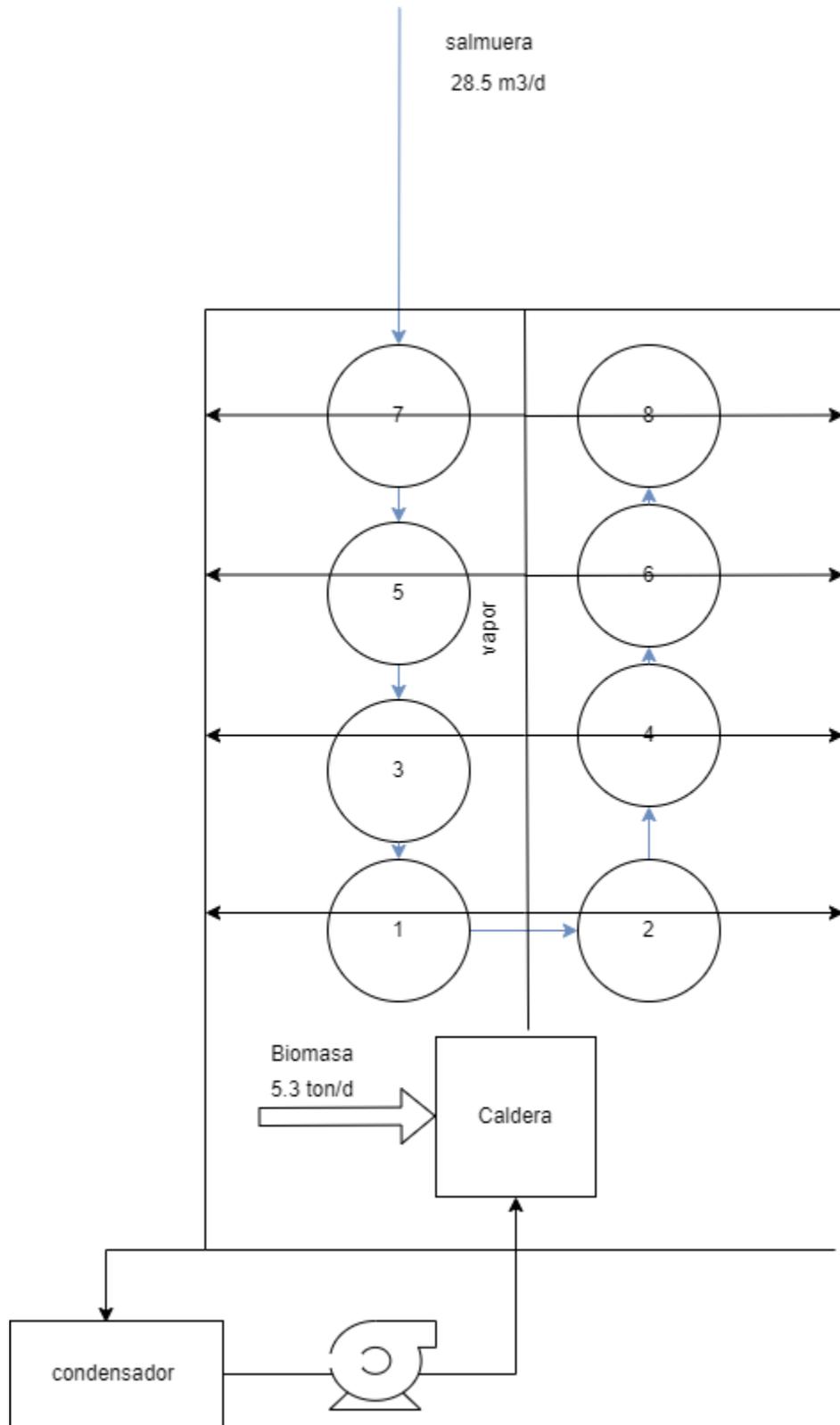


Figura 31. Diagrama caldera de biomasa

Para poder cumplir con las características y poder evaporar el residuo de la planta de osmosis inversa se seleccionó una caldera DHL que es una serie de caldera de vapor de biomasa (“DHL serie de caldera de vapor de biomasa - Caldera de biomasa - ZOZEN Caldera,” n.d.)

Tabla 19. Características caldera de biomasa DHL

Capacidad térmica del producto	20-75 t/h
Presión del trabajo	1,25-5.4Mpa
Temperatura de salida	184-485 °C
Combustibles aplicables :	Partículas de biomasa, astillas de madera, mazorca de maíz, polvo de sierra, etc.
Industrias de aplicación :	Generación de energía, fábrica química, industria de alimento, caucho.

Tabla 20. Costos estimados para planta desalinizadora autosostenible

dispositivo	cantidad	Costo unitario	Costo total+ iva 19%
Membrana LG BW 400 AFR G2	7	\$ 32.242	\$ 268.575
Bomba MALMEDI LINEA AZ 2x3x5A, 50-125A	1	\$ 1.500.000	\$ 1.785.000
Bomba multi etapa D/DG85-67x9	1	\$ 10.134.391	\$ 12.059.925

Panel Solar 540W 24V Monocrystalino ATLAS	127	\$ 851.690	\$ 128.715.910
regulado KW1220	1	\$ 50.500	\$ 60.095
inversor MAC 70 KTL3-X MV	1	\$ 7.288.530	\$ 8.673.350
Caldera de vapor de agua DHL	1	\$ 242.298.000	\$ 288.334.620
Soporte paneles solares	127	\$ 175.000	\$ 26.447.750
Cable AWG 18 Centelsa - Paneles-Regulador	8064	\$ 1.800	\$ 14.515.200
otros costos	-	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
subtotal	-	-	\$ 485.860.425
total + 20%	-	-	\$ 583.032.510

Consultando el precio del agua en carro tanques en la página (“Agua en Carro tanque,” n.d.) donde el precio de un carro tanque de 10 m³ tiene un valor de 180.000 pesos, además de un costo por transporte de 20.000 pesos por kilómetros. Asumiendo que la empresa se encuentre en barranquilla hasta el corregimiento de

Isabel López hay 50km esto daría un precio de 118.000 pesos, asumiendo que la planta desalinizadora trabaje por un año y produzca 1540.000 m³ se estimaría un costo de 4.000 pesos por m³ este valor se calculó solo con el precio de la planta sin tener en cuenta valores de obra civil y sin el precio de la compra del terreno necesario es cual se estima de 500 m². Que sería el área necesaria para los elementos de la planta más los paneles solares necesarios para el funcionamiento de esta.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJO A FUTURO

5.1. Conclusiones

De los municipios de Piojo, Campo de la Cruz, Tubará y Sabanalarga, el municipio de Sabanalarga es aquel que presenta mayores recursos hídricos, lo cual es de vital importancia para la planta de desalinización, que necesita un suministro constante de agua para poder abastecer a la población.

En el municipio de Sabanalarga se pueden encontrar agua superficial y agua subterránea por esto se tomaron muestras en los corregimientos de la Peña y Aguada de Pablo y como una muestra de agua subterránea del corregimiento de Isabel López, para realizar pruebas que permitieran conocer que elementos se encuentran en el agua y sus concentraciones. Estas pruebas demostraron que el agua no cumple los requerimientos establecidos en la Resolución 2115 de 2007 de la norma colombiana de calidad de agua. De los sitios evaluados, el agua subterránea de Isabel López es aquella que tenía mayor concentración de elementos en ella, lo que se confirmó con el líder de acción comunal quien menciona que el agua del pozo del sitio causaba deshidratación y diarrea en algunos casos.

Con una población estimada de 3800 habitantes y la premisa del consumo de 20 m³ mínimo mensual por familia, se obtuvo un requerimiento diario de 423 m³ para poder abastecer a las familias de este corregimiento. Con el conocimiento de las concentraciones del agua, se realizó el cálculo de la presión osmótica, que es necesaria para que establecer las condiciones de operación necesarias para el funcionamiento de la planta de desalinización de osmosis inversa. El requerimiento energético de la planta se suplirá con energía solar, lo que hace necesario la implementación de 700 Panel Solar 540W 24V Monocristalino ATLAS para garantizar el funcionamiento continuo de la planta de desalinización de osmosis inversa.

Para realizar el cálculo del rendimiento y la posibilidad de mejora en la planta de desalinización es necesario el cálculo exergético de la planta, a partir del cual se obtuvo una eficiencia en las bombas de 45.4%. Como se está usando el proceso de osmosis inversa, se emplea una configuración de dos fases con un factor de recuperación de 75%, el cual es lo recomendado por la literatura y produce 28.5 m³/día de desechos.

Como opciones se evaluó la destilación solar para evaporar la cantidad de salmuera, pero la gran área requerida para su implementación (80.000 m²) se buscó otra alternativa usando energías renovables. Como resultado, se emplea biomasa para alimentar una caldera y así evaporar toda la salmuera. Esta opción sería una opción más viable donde se eliminaría la salmuera además de consumir material de

desecho para alimentar la caldera, si se usa materia de un poder calorífico de 20.000 kJ/kg se necesitará 42.4 toneladas de biomasa al día.

5.2. Recomendaciones para trabajo futuro

1. Se recomienda hacer un estudio de las sales residuales del proceso de evaporación de la salmuera para identificar posible aprovechamiento en la industria
2. Se recomienda estudios para el aprovechamiento de la presión de salida en el proceso de osmosis inversa.
3. Evaluar nuevas configuraciones para la destilación solar
4. Investigar la viabilidad del diseño de un dispositivo para aprovechar el vapor de agua de la caldera de biomasa.

REFERENCIAS

- Agua en Carrotanque. (n.d.). Retrieved February 1, 2022, from <https://www.eaav.gov.co/ServiciosYProductos/Paginas/Agua-en-Carrotanque.aspx>
- Alnaimat, F., & Klausner, J. F. (2012). Solar diffusion driven desalination for decentralized water production. *Desalination*, 289, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.028>
- Alsarayreh, A. A., Al-Obaidi, M. A., Farag, S. K., Patel, R., & Mujtaba, I. M. (2021). Performance evaluation of a medium-scale industrial reverse osmosis brackish water desalination plant with different brands of membranes. A simulation study. *Desalination*, 503, 114927. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2020.114927>
- Analyze Results. (n.d.). Retrieved January 24, 2022, from <https://www-webofscience-com.ezproxy.uninorte.edu.co/wos/woscc/analyze-results/be0e48a4-8222-4e30-ab5e-1d6cd9c3e97e-20862bf4>
- Arellano-Escudero, N. (2015). *La ingeniería y el descarte artefactual de la desalación solar de agua : las industrias de Las Salinas, Sierra Gorda y Oficina Domeyko (1872-1907)*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2017.08.007>
- Atlas Interactivo - Radiación IDEAM. (n.d.). Retrieved September 17, 2021, from <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- Barrell, R., Benton, C., Boyd, P., Cartwright, R., Chada, C., Colbourne, J., ... Godfree, A. (2002). The microbiology of drinking water: water quality and public health. *Environment Agency*.
- Carrasquer, B., Martínez-Gracia, A., & Uche, J. (2016). Exergy costs analysis of water desalination and purification techniques by transfer functions. *Energy Conversion and Management*, 126, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.065>
- Çengel, Y. A. (2011). *TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA*. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?id=HiSRZwEACAAJ>
- Censo Nacional de Población y Vivienda - CNPV - 2018 | Datos Abiertos Colombia. (n.d.).
- Circe, A. V. (n.d.). *THERMOECONOMICS AS A CONCEPTUAL BASIS FOR ENERGY-ECOLOGICAL ANALYSIS*.
- Daniel Rivas Martinez, J., Sánchez Martin Darío, C., & de Jesús Velázquez Vázquez, M. (n.d.). *Diseño de un sistema de riego por goteo, sustentable para la producción de chile ancho*.
- Davies, J., & Giesen, W. (1994). Towards a methodology for identifying tropical freshwater wetlands for protection. *SIL Communications, 1953-1996*, 24(1), 27–

39. <https://doi.org/10.1080/05384680.1994.11904022>
- DHL serie de caldera de vapor de biomasa - Caldera de biomasa - ZOZEN Caldera. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from https://es.zozen.com/products/d_5bf267c6a62463774b440fc3.html?5xyFrom=site-NT
- Di Martino, M., Avraamidou, S., Cook, J., & Pistikopoulos, E. N. (2021). An optimization framework for the design of reverse osmosis desalination plants under food-energy-water nexus considerations. *Desalination*, 503. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114937>
- Energía de la Biomasa (volumen I) - Google Libros. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=P58rcPu5O90C&oi=fnd&pg=PA1&dq=biomasa&ots=GBNZrUxYlw&sig=uqiZyGp4DX_pgDN9MCUvetkZKfg#v=onepage&q=biomasa&f=false
- Ensayos Fisicoquímicos - Universidad del Norte. (n.d.). Retrieved January 24, 2022, from <https://www.uninorte.edu.co/web/laboratorio-de-hidraulica-e-ingenieria-ambiental/ensayos>
- Escobar, Y. C. (2011). Efectos de la Variabilidad Climática (vc) y el Cambio Climático (cc) en los Recursos Hídricos de Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 5(9), 33–61. Retrieved from <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/689>
- Fellaou, S., Ruiz-Garcia, A., & Gourich, B. (2021). Enhanced exergy analysis of a full-scale brackish water reverse osmosis desalination plant. *Desalination*, 506, 114999. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2021.114999>
- Figueroa, J. C. (2021). *CONTAMINACIÓN DEL CAUDAL DEL ARROYO ISABEL LÓPEZ 2 POLÍTICAS PÚBLICAS DEPARTAMENTALES APLICABLES PARA CONTROLAR LA CONTAMINACIÓN Y REDUCCIÓN DEL CAUDAL DEL ARROYO ISABEL LÓPEZ-ATLÁNTICO Proyecto de investigación JHONYS MÁRQUEZ BUJATO*.
- Gasmi, A., Belgaieb, J., & Hajji, N. (2010). Technico-economic study of an industrial reverse osmosis desalination unit. *Desalination*, 261(1–2), 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.04.060>
- Germán, •, Dévora-Isiordia, E., González-Enríquez, R., & Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 4(3), 27–46. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Hidrografía del Atlántico: Hidrografía Departamento del Atlántico Colombia. (n.d.). Retrieved September 17, 2021, from <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/atlantico/hidrografia.html>
- IDAE Instituto para la Diversificación. (n.d.). Retrieved from www.idae.es

- Inversor Solar Ongrid 70 Kw Trifasico 277vac 480v \$ 7.288.530 en Barranquilla - Atlantico | Mebuscar Colômbia. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from <https://mebuscar.com/co/item/inversor-solar-ongrid-70-kw-trifasico-277vac-480v-611981906>
- Jamaly, S., Darwish, N. N., Ahmed, I., & Hasan, S. W. (2014). A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. *Desalination*, *354*, 30–38. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2014.09.017>
- Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of The Total Environment*, *595*, 567–583. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.03.235>
- Khazada, N. K., Khan, S. J., & Davies, P. A. (2017). Performance evaluation of reverse osmosis (RO) pre-treatment technologies for in-land brackish water treatment. *Desalination*, *406*, 44–50. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2016.06.030>
- Lai, X., Long, R., Liu, Z., & Liu, W. (2021). Solar energy powered high-recovery reverse osmosis for synchronous seawater desalination and energy storage. *Energy Conversion and Management*, *228*, 113665. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.113665>
- LG BW 400 AFR G2 | Brackish Water Reverse Osmosis (BWRO) Membranes | Products | LG Water Solutions. (n.d.). Retrieved January 14, 2022, from <https://www.lgwatersolutions.com/en/product/brackish-water-ro/LG-BW-400-AFR-G2>
- Los destiladores solares | sitiosolar. (n.d.). Retrieved January 8, 2022, from <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>
- LOS MINISTROS DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Y DE AMBIENTE, V., & TERRITORIAL, Y. D. (23AD). *RESOLUCIÓN NÚMERO 2115* (p. 2007). p. 2007.
- Manual de energía eólica - ESCUDERO LOPEZ, JOSE MARIA - Google Libros. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bY33m9Z3NAEC&oi=fnd&pg=PA43&dq=energía+eólica&ots=X-LBS6eFwC&sig=vK08V3Qy9cMorwERwNfuOkmcU-M#v=onepage&q=energía eólica&f=false>
- Mercado, C. (2015). Evaluación de un sistema de desalinización solar, tipo concentrador cilíndrico parabólico de agua de mar. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, *6*(4).
- Modeling Processes with Electrolytes Aspen Plus 7*. (1981).
- Nguyen Xuan Que, V., Van Tuan, D., Nhat Huy, N., Le Phu, V., Chi Minh City, H., Trung Ward, L., & Duc District, T. (2021). Design and performance of small-scale reverse osmosis desalination for brackish water powered by photovoltaic units: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *652*(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/652/1/012024>

- Okampo, E. J., & Nwulu, N. (2021). Optimisation of renewable energy powered reverse osmosis desalination systems: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110712. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.110712>
- Pan, S. Y., Haddad, A. Z., Kumar, A., & Wang, S. W. (2020a). Brackish water desalination using reverse osmosis and capacitive deionization at the water-energy nexus. *Water Research*, 183, 116064. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116064>
- Pan, S. Y., Haddad, A. Z., Kumar, A., & Wang, S. W. (2020b, September 15). Brackish water desalination using reverse osmosis and capacitive deionization at the water-energy nexus. *Water Research*, Vol. 183. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116064>
- Panel Solar 540W 24V Monocrystalino ATLAS | AutoSolar. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from <https://autosolar.co/paneles-solares-24v/panel-solar-540w-24v-monocrystalino-ecogreen>
- Panepinto, D., Fiore, S., Zappone, M., Genon, G., & Meucci, L. (2016). Evaluation of the energy efficiency of a large wastewater treatment plant in Italy. *Applied Energy*, 161, 404–411. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027>
- Park, K., Burlace, L., Dhakal, N., Mudgal, A., Stewart, N. A., & Davies, P. A. (2020). Design, modelling and optimisation of a batch reverse osmosis (RO) desalination system using a free piston for brackish water treatment. *Desalination*, 494(August), 114625. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114625>
- Park, K., & Davies, P. A. (2021). A compact hybrid batch/semi-batch reverse osmosis (HBSRO) system for high-recovery, low-energy desalination. *Desalination*, 504. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.114976>
- Pietrucha-Urbanik, K., & Rak, J. R. (2020). Consumers' perceptions of the supply of tap water in crisis situations. *Energies*, 13(14). <https://doi.org/10.3390/en13143617>
- Regulador Controlador Carga Baterías Panel Solar 20a 12/24v | MercadoLibre. (n.d.). Retrieved January 16, 2022, from https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-467908109-regulador-controlador-carga-baterias-panel-solar-20a-1224v-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=9a25954d-e47d-4e43-b5f3-fac5f359f0cb
- Sabanalarga - Google Maps. (n.d.).
- SAENZ, C. I. S. (2009). *SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE UNA MEMBRANA DE INTERCAMBIO ANIÓNICO CON APLICACIÓN EN CELDAS DE COMBUSTIBLE ALCALINAS*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Sanna, A., Buchspies, B., Ernst, M., & Kaltschmitt, M. (2021). Decentralized brackish water reverse osmosis desalination plant based on PV and pumped storage - Technical analysis. *Desalination*, 516, 115232.

<https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2021.115232>

- Santana, M. del C., Bonilla Tovar, J. F., & Castillo Sotomayor, C. A. (2015). *Rango de consumo básico*. Bogotá, Colombia.
- Sarai Atab, M., Smallbone, A. J., & Roskilly, A. P. (2018). A hybrid reverse osmosis/adsorption desalination plant for irrigation and drinking water. *Desalination*, 444(July), 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.008>
- Sathyamurthy, R., El-Agouz, S. A., Nagarajan, P. K., Subramani, J., Arunkumar, T., Mageshbabu, D., ... Prakash, N. (2017). A Review of integrating solar collectors to solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(October 2015), 1069–1097. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.223>
- Simonovic, S. P. (2003). Assessment of water resources through system dynamics simulation: from global issues to regional solutions. *36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2003. Proceedings of The*, 9 pp. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2003.1174224>
- SUEZ. (2021). Winflows System Design Software.
- Wang, Zhangxin, Feng, D., Chen, Y., He, D., & Elimelech, M. (2021). Comparison of Energy Consumption of Osmotically Assisted Reverse Osmosis and Low-Salt-Rejection Reverse Osmosis for Brine Management. *Environmental Science and Technology*, 55(15), 10714–10723. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.1C01638/SUPPL_FILE/ES1C01638_SI_001.PDF
- Wang, Zhuo, Zhang, Y., Wang, T., Zhang, B., & Ma, H. (2021). Design and Energy Consumption Analysis of Small Reverse Osmosis Seawater Desalination Equipment. *Energies 2021, Vol. 14, Page 2275*, 14(8), 2275. <https://doi.org/10.3390/EN14082275>
- Zhang, S., Cheng, X., Shen, F., Zhang, S., Cheng, X., & Shen, F. (2018). Condensation Heat Transfer with Non-Condensable Gas on a Vertical Tube. *Energy and Power Engineering*, 10(4), 25–34. <https://doi.org/10.4236/EPE.2018.104B004>

6. ANEXOS

6.1. Planos de la planta de osmosis inversa

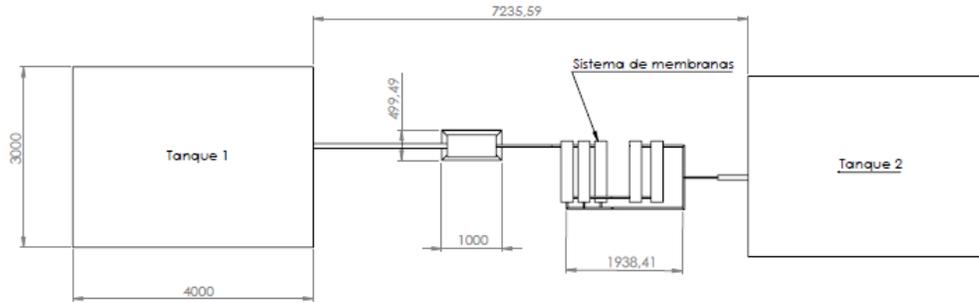


Figura 32. vista superior planta de osmosis inversa

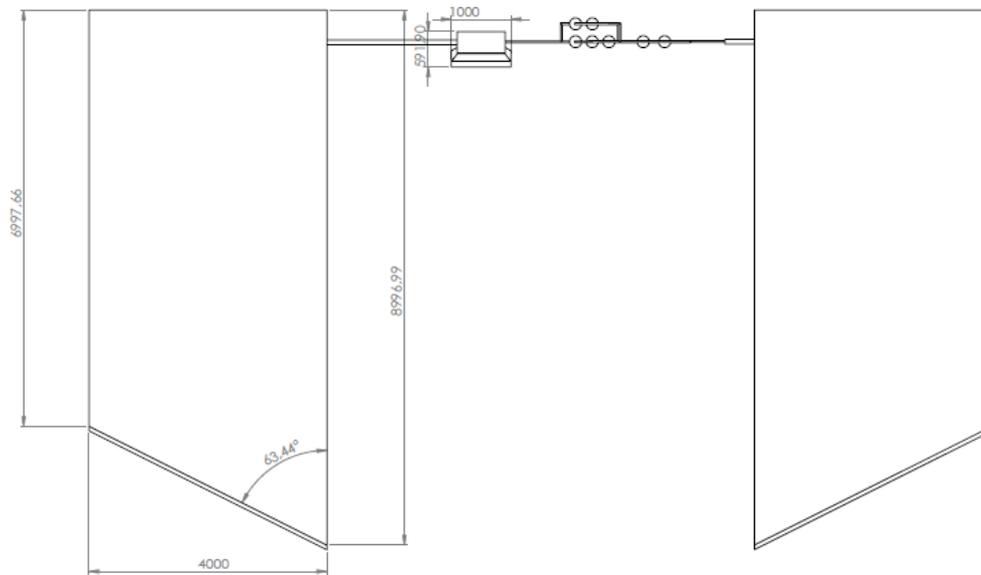


Figura 33. Vista frontal planta osmosis inversa

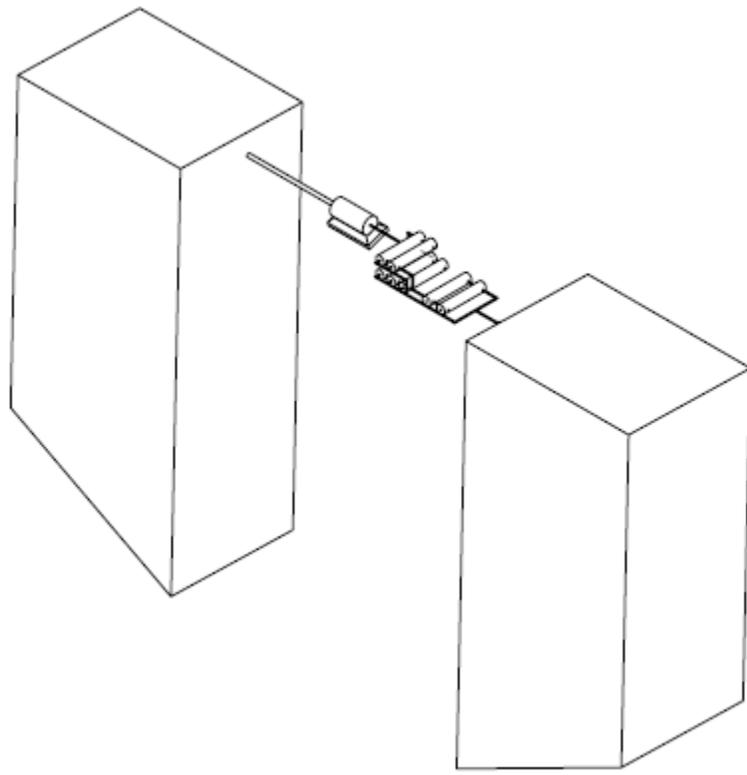


Figura 34. Vista isométrica planta osmosis inversa