



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Viabilidad técnica y
económica en el diseño de una
planta desaladora que utilizará
energía solar y/o energía
eólica para la obtención de
agua potable en la Guajira
colombiana.

Autor: Fernando Alirio Agudelo Acevedo

Tutores: Cristian Fàbrega – Albert Casas.

Curs acadèmic: 2020-21

Màster en Energies Renovables i
Sostenibilitat Energètica

Dos Campus d'Excel·lència Internacional:



Contenido

1.	Descripción del Proyecto	6
2.	¿Por qué utilizar Ósmosis Inversa como método para la obtención de agua potable?.....	6
2.1.	Métodos por Evaporación	7
2.2.	Método por Congelación.....	7
2.3.	Método por Evaporación Solar.....	7
3.	¿Cuál es el Caudal necesario?.....	8
4.	Energía necesaria para realizar la ósmosis inversa.	9
4.1.	Presión Neta de trabajo (PNT):	10
4.2.	Energía Neta por producir:	11
4.2.1.	Energía para el proceso de Ósmosis Inversa (OI).	12
4.2.2.	Energía del equipamiento asociado al proceso de Ósmosis Inversa (OI).....	12
4.2.3.	Cuadro Resumen Consumo Eléctrico:	14
4.3.	Dimensionamiento del Sistema Eléctrico.....	16
4.3.1.	Diseño Planta a partir de Energía Eólica.....	16
4.3.2.	Diseño Planta a partir de Energía Fotovoltaica.	18
4.3.3.	Resumen de Cobertura de la Demanda Energética.	20
5.	Impacto ambiental en la Desalinización.	21
5.1.	Manejo de la Salmuera resultante.....	21
5.2.	Manejo de residuos químicos.	21
5.3.	Impacto a la fauna de los lugares.	22
6.	Aspectos Económicos.....	22
6.1.	Costos de Inversión y Recuperación de la inversión.	22
6.1.1.	Inversión Sistema de Energía Eólica.....	25
6.1.2.	Inversión Sistema de Energía Fotovoltaica.....	27
6.1.3.	Cuadro de Resumen Desalinización con Fuentes Convencionales y con Fuentes de Energía Renovables FV y Eólica.	28
6.1.4.	Análisis de Payback actualizado (PBA).....	29
6.1.4.1.	Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para la fuente de energía Eólica.	29
6.1.4.2.	Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para la fuente de energía Fotovoltaica.	31
6.1.4.3.	Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para una Combinación entre energía Eólica y energía Fotovoltaica.	32
7.	Conclusiones.....	34
	Bibliografía.....	37

Contenido de Ilustraciones

Ilustración 1. Funcionamiento de una planta desalinizadora.....	12
Ilustración 2. Curva de Potencia de aerogenerador vs. Análisis de viento	18
Ilustración 3. Vista del Proyecto con el sistema FV.....	18
Ilustración 4. Escenarios de producción Sistema Asistido por Red.....	20

Contenido de Tablas

Tabla 1. Proporción de sales disueltas en los Océanos.....	9
Tabla 2. Contenido de Sales en el Agua de Mar.....	9
Tabla 3. Ecuaciones de los Modelos de Membranas "Phenomenological" y "mechanistic".	10
Tabla 4. Rendimiento tipo en Plantas nuevas de desalación.	12
Tabla 5. Especificaciones técnicas Bomba elevadora	13
Tabla 6. Resumen Consumo Eléctrico	15
Tabla 7. Membranas comerciales que utilizar.	15
Tabla 8. Datos Estación Meteorológica.....	16
Tabla 9. Parámetros Potencial Eólico.....	17
Tabla 10. Consolidado de Posibles Aerogeneradores a utilizar.....	17
Tabla 11. Datos Climáticos simulación PV*SOL	19
Tabla 12. Datos Climáticos utilizados	19
Tabla 13. Parámetros de Consumo	19
Tabla 14. Resultados del Sistema Fotovoltaico.....	19
Tabla 15. Resumen de la Cobertura de la Demanda Energética.....	20
Tabla 16. Supuestos clave para una planta SWRO, almacenamiento y transporte de agua en un modelo para 2030 [Caldera et al. (2016)].....	24
Tabla 17. Resultados costos de producción obtenidos según los factores Caldera et al (2016).	24
Tabla 18. Resultados costos de almacenamiento obtenidos según los factores propuestos por Caldera et al (2016).	24
Tabla 19. Resumen costos variables.....	25
Tabla 20. Costos y supuestos técnicos para plantas híbridas de energía FV, Eólica, Baterías y PtG en el 2030 [Caldera et al. (2016)].....	26
Tabla 21. Resultados de costos de Planta Eólica según los factores de Caldera et al (2016)	26
Tabla 22. Resultados de costos de Planta Eólica según los factores de Caldera et al (2016)	27
Tabla 23. Resumen para desalinizar agua de mar con diferentes formas de generación de energía.....	29

Contenido de Anexos

Anexo 1. Densidad Poblacional Guajira Colombia.....	39
Anexo 2. Datos de Viento Aeropuerto.	40
Anexo 3. Análisis Potencial Eólico del Punto de Referencia.	44
Anexo 4. Costos nivelados de Generación de Electricidad a partir de Energía Eólica en Colombia.	45
Anexo 5. Costos nivelados de Generación de Electricidad a partir de Energía FV en Colombia	46
Anexo 6. Tasa de Captación para Inversión en Colombia.....	47
Anexo 7. Cálculo PBA en el Sistema de Energía Eólica.....	48
Anexo 8. Cálculo del Valor Actual Nominal (VAN) para el sistema de Energía Eólica.....	50
Anexo 9. Cálculo PBA para el sistema Fotovoltaico.....	51
Anexo 10. Cálculo del VAN en el Sistema Fotovoltaico	52
Anexo 11. Cálculo del PBA para la Energía FV y Eólica	53
Anexo 12. Cálculo del VAN para energía FV y Eólica.....	54
Anexo 13. Cálculo para la Recuperación de la Inversión con la venta del agua.	55

Glosario

GPD: Galones por día.

GPM: Galones por minuto.

TDS: Total de Sólidos Disueltos.

TSS: Total de Sólidos en Suspensión.

TDS: Total de Sólidos Disueltos.

OI: Ósmosis Inversa.

FV: Fotovoltaica.

LATAM: Latinoamérica.

Objetivo General

Determinar la viabilidad técnica y económica de una planta desaladora que utilizará energía solar y/o energía eólica para la obtención de agua potable en la Guajira colombiana.

Objetivos Específicos.

- ✓ Realizar los cálculos necesarios para obtener un caudal de trabajo que asegure el suministro de agua potable a una población muestra.
- ✓ Describir las tecnologías existentes para obtener agua potable a partir de agua de mar en la Guajira Colombiana.
- ✓ Seleccionar la tecnología adecuada para generar la energía eléctrica asociada a un proceso de Ósmosis Inversa.
- ✓ Obtener el balance energético entre la energía convencional, la energía fotovoltaica y la energía eólica utilizadas en la potabilización del agua.
- ✓ Observar las posibles salidas de los minerales existentes en la salmuera resultante al proceso de ósmosis inversa.
- ✓ Validar el impacto ambiental al implementar tecnologías fotovoltaicas o energía eólica en la producción de agua potable.
- ✓ Verificar el plan de retorno de la inversión según la tecnología a implementar.

INTRODUCCIÓN

El cambio inminente que está teniendo el mundo a raíz de las variaciones del clima y la sobrepoblación ha hecho que el recurso hídrico sea más limitado. Desalar agua de mar a través de energías renovables puede ser una solución a muchas poblaciones que tienen difícil el acceso al recurso hídrico, en el caso de Colombia, existen etnias indígenas que se han visto vulneradas por no tener el acceso a este recurso.

Las energías renovables cobran un valor muy importante en la generación de energía de manera limpia y con costos competitivos. Es por eso por lo que una población muestra como la de Carrizal en la Guajira, puede ser el inicio a incorporación de plantas en todo el territorio y de esa manera se pueda tener una mejor calidad de vida en esa población.

El presente documento busca identificar los parámetros involucrados en la desalinización de agua de mar, así como también se incluye el estudio de las tecnologías que pueden estar operativas en las condiciones propias del lugar, a partir de allí se analizará la viabilidad técnica y económica con la que se podrá determinar la inversión del Estado.

1. Descripción del Proyecto.

El proyecto se desarrollará en una población muestra ubicada en Carrizal – Uribia, Guajira, Colombia, más exactamente en las coordenadas 12.018555; -72.175367. Dicho punto es estratégico para la obtención de agua potable, considerando que esta población por décadas ha tenido problemas de abastecimiento por su ubicación geográfica y por situaciones socioculturales propias de la región. Es de resaltar que este lugar cuenta con un elevado potencial solar y eólico y tiene cercanía al mar, con lo cual lo hace un punto favorable para la obtención del agua potable para el beneficio de la población.

En consideración a que el agua necesaria para una persona normalmente es de 100lt por día, lo que es equivalente a 0,1m³/día, se analizará la forma de como cubrir dicho suministro para una población de cultura Wayúu ubicada en el territorio ya descrito. La población objetivo que quedará cubierta por el proyecto será de 154.898 personas², con lo cual, el diseño deberá suministrar un caudal mínimo de 15.489 m³ de agua/día representando un desafío importante de energía y costos de inversión.

Carrizal, Uribia, La Guajira Colombia.	
	
Ubicación Geográfica	12.018555; -72.175367.
Población Wayúu	154.898
Cercanía al mar ¹	315m.

El diseño de la planta desaladora incluirá el dimensionamiento físico del espacio, así como la incorporación de tecnología necesaria para cubrir la demanda por día.

2. ¿Por qué utilizar Ósmosis Inversa como método para la obtención de agua potable?

Varios estudios han arrojado que la tecnología más competitiva en cuanto a la energía necesaria y el costo asociado en la obtención de agua potable a partir de agua de mar es la Ósmosis Inversa, OI. Así como se menciona en el artículo Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México realizado por Germán Eduardo Dévora Isirdia, Rodrigo González Enríquez y Saúl Ruiz Cruz del Instituto Tecnológico de Sonora, México, ponderan que: “El tipo de tecnología que requiere menor consumo energético es OI, de 2 a 2.8 kWh/m³ y costo de 0.6 USD/m³; las tecnologías MED y MSF consumen de 3.4 a 4 kWh/m³ y de 5 a 8 kWh/m³, respectivamente, con un costo de producción de 1.5 USD/m³ y 1.10 USD/m³. La comparación entre tecnologías permite determinar que el consumo energético y costo de producción de OI es menor y con mayor producción de agua desalinizada;

¹ Fuente: Datos Google Maps. 2021.

² Fuente: DANE: DCD. CNPV 2018.

además presenta ventajas significativas sobre el resto debido a que no requiere cambios de estado, como en MED y MSF. La OI es el proceso más viable en producción, energía consumida y costo.”.

Existen varios métodos que se utilizan para la obtención de agua potable a partir de agua de mar, dentro de estos encontramos la microfiltración, la destilación múltiple etapa (MED), la destilación flash múltiple etapa (MSF), la congelación, la evaporación relámpago, entre otros. Estos métodos son bastante costosos en términos de energía eléctrica utilizada y no se obtienen los mismos resultados en términos de filtración de partículas.

2.1. Métodos por Evaporación

Es posible diferenciar dos procedimientos para llevar a cabo la técnica de evaporación; a través de procesos térmicos y procesos por compresión. Los procesos térmicos consisten en suministrar la energía necesaria en forma de calor, mientras que, en los procesos por compresión, la fuente de energía es el trabajo.

Evaporación instantánea multietapa (MSF): se conoce también como Multistage Flash Evaporation, es una técnica que se basa en evaporar el agua de mar en un evaporador con numerosas cámaras que trabajan a temperaturas y presiones que decrecen de forma progresiva, de modo que ocurre una separación de las sales y el agua que es depositada en una cámara diferente.

Evaporación por multiefecto (MED): esta técnica es similar a la MSF, pero en este caso el aporte de energía térmica es realizado por un intercambiador de calor.

Compresión de vapor (CV): se basa en utilizar un compresor con que se aumenta la presión y la temperatura del vapor que genera el evaporador. La compresión resultante puede ser de simple o doble efecto, o también por compresión mecánica o térmica.

2.2. Método por Congelación

En el caso de la congelación se puede dar de dos formas: una es haciendo uso de un agente refrigerante o dos, haciendo la expansión del agua. Ésta última se da cuando el agua de mar se congela parcialmente a una presión absoluta de mmHg y -4°C , lo que provoca una evaporación acompañada de una congelación por enfriamiento. Para el caso del uso de agente refrigerante se utiliza este para congelar el agua sin que se mezclen.

2.3. Método por Evaporación Solar

En esta técnica se usa el calor producido por el sol para evaporar el agua de mar para luego recolectar el vapor producido en una superficie fría obteniendo el agua de producto resultante.

En muchos de los casos anteriormente mencionados, se hace necesario que el producto obtenido por cada uno de estos debe pasar por un proceso de ósmosis inversa (OI) para lograr resultados favorables en el agua producto. Dicho de otra manera, si se hace uso directamente de OI de membranas de polímeros semipermeables de alta eficiencia, comparado con las tecnologías ya mencionadas, la OI cobra gran relevancia en la industria del agua potable. “La osmosis inversa demuestra su capacidad selectiva reteniendo sobre el 99,5% de las sales disueltas, lo que produce agua apta para consumo humano, procesos industriales y también para riego agrícola”, menciona Aldo Saavedra Fenoglio es profesor del departamento de ingeniería química de la Universidad de Santiago, en Chile, e investigador del Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas, LabProSeM.

Por otro lado, las tecnologías de OI vienen mejorando continuamente, existen investigaciones en Estados Unidos, que han logrado resultados de mejor rendimiento haciendo uso de materiales como el grafeno, con el que se obtienen membranas que requerirán menos presión y por ende menos energía. También se están realizando pruebas con membranas de nanotubos de carbono, pero ambas investigaciones siguen en etapa experimental y no han llegado a la industria³. Con lo anterior, puede

³ Fuente: ¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua? Alejandra Martins. BBC Mundo. 22 marzo 2017.

decirse que las tecnologías de Ósmosis Inversa seguirán mejorándose con el paso del tiempo, por la tanto, desalar agua de mar haciendo uso de la OI, será el método adecuado para la potabilización de agua salada o salobre.

Sin embargo, cabe resaltar el proceso de OI arroja un residuo importante al realizar el paso de agua de mar a través de la membrana ejerciendo alta presión, con el fin de retener las partículas diluidas en el agua. La salmuera resultante se vuelve un residuo importante que debe manejarse para de manera correcta para que el impacto en el medio ambiente sea bajo.

Por ejemplo, así como lo especifica Ruiz Mateo (2007), en su artículo: los vertidos al mar de las plantas desaladoras. *“Una planta con una producción de 70.000 m³/día de agua producto generará un vertido líquido de 1 m³/s si es de ósmosis inversa alimentándose de agua de mar (conversión del 45%), de 0,2 m³/s si es de ósmosis inversa alimentándose de agua salobre (conversión del 80%) y de 7,3 m³/s si es de destilación (conversión del 10%).”* Partiendo de esos valores, se deberá analizar con bastante entereza cual será la disposición final de estos ‘subproductos’, para que una vez obtenidos, sean reutilizados o vertidos de manera controlada para que el impacto ambiental al lugar sea mínimo.

3. ¿Cuál es el Caudal necesario?

El sistema estará planeado para que exista un caudal constante de agua de mar, por lo que se realizará la captación desde unas torres elevadas al interior del mar que conducirán el agua a cuartos de bombas subterráneos aproximadamente a 30 metros de profundidad. El agua de mar será depositada en unos cuartos de bombas que la albergarán para posteriormente elevarla a la superficie a través de cuatro (4) bombas centrífugas de acero inoxidable considerando que el fluido a elevar puede llegar a ser muy corrosivo, dos de ellas trabajarán constantemente y las otras dos alternarán trabajos para los casos de mantenimiento. De esta manera se puede asegurar el caudal necesario de trabajo.

El diseño deberá incluir un caudal mínimo de 15.489 m³ de agua/día para suplir a toda la población Wayúu de la Guajira colombiana. De esta manera y para evitar desviaciones en el diseño, así como satisfacer el crecimiento poblacional, se contempla un porcentaje de desviación y crecimiento del sistema de un 25%, por lo tanto, el caudal que se deberá lograr será de 19.361 m³ de agua/día. Partiendo de este punto y según el registro existente en el informe anual de desalinizadoras en el mundo, se dice que para producir 1 m³ de agua potable se hacen necesarios 2,5 m³ de agua de mar, de esta manera entonces, se estima que deberá contarse con un volumen total de 48.403 m³ agua de mar por día para la producción propuesta. Dicho de otra manera, en cantidad de l/min de caudal de entrada, tendríamos:

$$48.403 \frac{m^3}{día} * \frac{1000l}{1m^3} * \frac{1día}{1440min} = 33.613 \frac{l}{min}$$

O también puede decirse un **caudal de entrada de agua de mar** por hora es de:

$$48.403 \frac{m^3}{día} * \frac{día}{24h} = 2.016,79 \frac{m^3}{h}$$

Para trabajar con valores redondos, se dirá de acá en adelante que deberán procesarse 34.000 l/min o 2.000 m³/h de agua de mar como caudal de entrada para satisfacer la necesidad del proyecto y de esta manera obtener a la salida de la planta un caudal de agua fresca de:

$$19.361 \frac{m^3}{día} * \frac{1000l}{1m^3} * \frac{1día}{1440min} = 13.445 \frac{l}{min}$$

O también puede decirse un **caudal de salida de agua fresca** por hora es de:

$$19.361 \frac{m^3}{día} * \frac{día}{24h} = 806 \frac{m^3}{h}$$

Con lo cual, el caudal con el que se dimensionará el consumo energético de cada componente será el caudal de salida. Adicionalmente durante el proceso de trabajo existirá un caudal residual (salmuera) de $1.210,79 \frac{m^3}{h}$.

4. Energía necesaria para realizar la ósmosis inversa.

Colombia es un país Sudamericano que cuenta con recursos hídricos de agua dulce importantes, sin embargo, es un recurso limitado que no llega a todas las partes, La Guajira, es un ejemplo, por lo tanto, la desalación podrá ser la forma de solucionar el problema. Se obtendrá el agua necesaria en el mismo sitio.

Al no contar con una medida precisa del soluto disuelto en el agua del Océano Atlántico, se trabajó con las medidas existentes según el material de clases del curso Geografía del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Chile. En el material se muestran las propiedades químicas del agua del océano, y a partir de los valores de la Tabla 1 se calcula la cantidad de energía requerida en el proceso de Ósmosis Inversa.

Sales disueltas	Peso (grs por cada 1000 ml agua)	% Total
Cloruro de Na	27.213	77.8
Cloruro de Mg	3.807	10.9
Sulfato de Mg	1.658	4.7
Sulfato de Ca	1.260	3.6
Sulfato K	0.863	2.5
Carbonato de Ca	0.123	0.5
Bromuro de Mg	0.076	

Tabla 1. Proporción de sales disueltas en los Océanos.⁴

La presión osmótica puede ser estimada según la ecuación de van't Hoff quien la define como:

$$\Pi[atm] = C * R * T \quad (1)$$

Donde:

$$C = \sum m_i: \text{sumatoria de la concentración molar } \left(\frac{\text{moles}}{L}\right) \text{ o } \left(\frac{\text{moles}}{kg}\right)$$

R: Constante Universal de Gases (0,08206 L atm/mol K).

T: Temperatura absoluta.

La concentración de soluto que existe en un litro de agua de mar es 35g por cada litro (35g/L).

Compuesto	Peso Molecular
NaCl	58.44 g/mol
MgCl ₂	95.211 g/mol
MgSO ₄	120.366 g/mol
CaSO ₄	136.14 g/mol
K ₂ SO ₄	174.259 g/mol
CaCO ₃	100.0869 g/mol
LiBr	86.845 g/mol

Tabla 2. Contenido de Sales en el Agua de Mar.

$$\sum m_i = 0,5358 \frac{\text{moles de soluto}}{1kg \text{ de } H_2O}$$

⁴ Fuente: Material de clases. Curso Geografía del Mar. Propiedades del Agua de Mar. Propiedades químicas del agua del océano. Proporción de Sales disueltas en los océanos.

En un análisis detallado en la revisión en el estado del arte de ósmosis inversa propuesto por Qasim et. al. se menciona que en el caso de la OI de agua de mar puede utilizarse una aproximación que puede emplearse en el proceso:

$$\Pi[psia] = 1,12 * T * \sum m_i \quad (2)$$

Donde:

Π : Presión osmótica. Se expresa en psia.

$\sum m_i$: concentración molar de la disolución. Se expresa moles/litro.

T: temperatura en °K.

A partir de la propuesta de Qasim et al (2019), para un agua de mar con salinidad de 35.000 ppm, al aplicar la ecuación anterior bajo condiciones ideales y con una temperatura promedio en la Guajira de 29°C, se obtiene:

$$\begin{aligned} \Pi[psia] &= 1,12 * (29 + 273)^\circ\text{K} * 0,5358 \frac{\text{moles de soluto}}{\text{litro}} \\ \Pi[psia] &= 181,32 \text{ psia} = 12,34 \text{ atm} \end{aligned}$$

La presión osmótica obtenida será la necesaria para retener el soluto diluido. Qasim et al (2019) proponen rangos de presión que van desde 0,60 a 1,1 psi para soluciones de 100 ppm, y que a partir de allí puede estimarse una presión necesaria de 350 psi para disoluciones de agua de mar de 35000 ppm, sin embargo, por la resistencia que ejerce la membrana en el proceso de OI menciona que deberán manejarse presiones elevadas que pueden requerir alrededor de 1500 psi.

4.1. Presión Neta de trabajo (PNT):

La presión neta de trabajo que se necesita para desalar agua de mar dependerá en gran medida del tipo de membrana a utilizar, ya que a través de esta se produce el permeado o flujo de agua volumétrico. En el trabajo propuesto por Qasim et al (2019), se menciona que el flujo de agua permeado y el flujo de sales estará dado por diferentes modelos de transporte en la OI. En la actualidad hay dos tipos de membranas: los modelos “phenomenological” y los modelos “mechanistic”.

Modelo “Phenomenological”	Modelo “Mechanistic”
$J_w = l_p(\Delta p - \sigma \Delta \pi) \quad (3)$	$J_w = A(\Delta p - \Delta \pi) \quad (4)$
J_w : flujo de agua o agua permeada.	J_w : flujo de agua o agua permeada.
Δp : diferencia en presión hidráulica al pasar la membrana.	Δp : diferencia en presión hidráulica al pasar la membrana.
$\Delta \pi$: diferencia de presión osmótica al pasar la membrana.	$\Delta \pi$: diferencia de presión osmótica al pasar la membrana.
$l_p - \sigma - \omega$: coeficientes en función de la relación entre flujo de cada componente de la solución y la fuerza de acción de este en el sistema.	A: coeficiente de permeabilidad.
$J_s = \omega \Delta \pi + (1 + \sigma) J_w C_{avg} \quad (5)$	$J_s = B(C_m - C_p) + l_{sp} \Delta p \quad (6)$
J_s : flujo de sales.	J_s : flujo de sales.
C_{avg} : concentración media logarítmica de soluto a través de la membrana.	C_m : Concentración de soluto sobre la superficie de la membrana.
	C_m : Concentración de soluto permeable.
	B: coeficiente de la permeabilidad de la membrana para el soluto.
	l_{sp} : presión inducida.

Tabla 3. Ecuaciones de los Modelos de Membranas “Phenomenological” y “mechanistic”.

A partir de estas de estas ecuaciones, se observa que para obtener los flujos esperados se deberá analizar la diferencia de entre presiones las presiones hidrostática y osmótica, así como los coeficientes que aportan el tipo de membranas a utilizar. De esta manera se buscará un mayor flujo de agua permeada y un flujo de sales resultantes en igual medida. Es por eso por lo que es importante una buena selección de los elementos para asegurar una menor cantidad de energía necesaria relacionada con la presión que asegure el flujo de agua pura de diseño.

Para hacer pasar el agua de mar a través de la membrana, el trabajo de Qasim M, et al, propone que las presiones requeridas para el proceso de desalación de agua de mar pueden demandar hasta unos 1500 psi de presión y deberán utilizarse alrededor de 2,54 kWh/m³, equivalente a un 71% de la energía consumida por la planta, el resto de la energía estará dado en un 10,8% para el pretratamiento, 5% para la entrega de producto final y 7,6% para otras actividades.

4.2. Energía Neta por producir:

En este caso para tener un estimado de la energía necesaria para el proceso de desalinizado, deberán analizarse los casos de uso de las tecnologías y de esa manera seleccionar la energía de trabajo. Con el paso de los años se ha visto como se ha mejorado considerablemente el uso de la energía para la obtención de agua fresca y entre esos el estudio propuesto por Qingfen Ma - Hui Lu en su trabajo de 2011 mencionan que: “La OI es una de las tecnologías más eficientes para la desalación, requiere alrededor de **3–10 kWh** de energía eléctrica por m³ de agua fresca producida desde agua de mar”.

Por otro lado, Sharon y Reddy (2015) proponen que haciendo uso de agua salada de baja concentración salina bajo ciertas condiciones la cantidad de energía necesaria para el proceso es baja: “Khayet et al. desarrolló una unidad de desalinización de OI alimentada por energía solar y fotovoltaica que consta de una bomba de baja presión, una bomba de alta presión, una membrana compuesta de película delgada de poliamida enrollada en espiral (1,2m²), y un colector térmico esférico para precalentar el agua de alimentación. La presión de alimentación, el caudal y la temperatura óptimos para una concentración de alimentación de 6 g/l fueron 7,7 bar, 252,8 l/h y 33 °C, respectivamente. La unidad de OI es capaz de producir un permeado de al menos 0,2 m³/d con un consumo de energía inferior a **1,3 kWh/m³**”.

Caldera et al (2016) proponen que: “La desalación tiene un alto consumo específico de energía (SEC), en comparación con los métodos tradicionales de tratamiento de agua. Grubert et al. (2011) sugieren que el uso típico de energía para el tratamiento de agua dulce superficial es de aproximadamente 0,06 kWh/m³. En contraste, el uso de energía para la desalinización de agua de mar es del orden de **3,6 a 4,5 kWh/m³**. Ghaffour et al. explica que, dependiendo de la tecnología de desalinización, el SEC total puede oscilar entre **0.5–16 kWh/m³**”.

Finalmente, Okampo y Nwuluen (2021) mencionan en sus trabajos que, “La OI requiere entre **2–4 kWh** para producir 1m³ de agua fresca, por su parte, Bundschuh et al (2021), muestran el progreso en el uso de estas tecnologías con las que puede conseguir los resultados esperados, menciona que: “La cantidad de permeado varía mucho, desde 200 a 104.000 L/h, con tasas SEC de 2,5 a 225 kWh/m³. La instalación en Lough Borough (Gran Bretaña) con el SEC de **2,5 kWh/m³** y una cantidad de permeado de **500 L/h** se caracteriza por el menor gasto de energía en relación con la unidad de agua desalada”. también hacen referencia a un tema muy interesante con relación a unos procesos emergentes en los que se vienen trabajando para obtener mejores rendimientos en la obtención de agua a partir de agua de mar como lo son: la Ósmosis Forzada (FO), desalinización adsorción (AD) y la membrana de destilación (MD) están desarrollándose y pueden tener un gran potencial en el futuro.

En consideración a lo anterior y a las mejoras constantes en las membranas utilizadas en la OI, se hará un estimado típico de energía de **2,5 kWh/m³**. El sistema que se busca tendrá que generar la energía suficiente para el proceso de osmosis inversa (EO), así como la energía requerida por el equipamiento asociado al proceso (EE), como lo son bombas elevadoras, filtros, sistemas de purificación, entre otras:

$$E_N = E_O + E_E \quad (7)$$

4.2.1. Energía para el proceso de Ósmosis Inversa (OI).

En el caso de la energía para el proceso de OI estará dado por:

$$E_o = \bar{\Pi} * V \quad (8)$$

Donde $\bar{\Pi}$ es la presión promedio que se utilizan en un proceso industrial de osmosis inversa (1500 psi) y que típicamente para obtenerla se hace necesaria una energía promedio 2,5 kWh por cada m³ de agua de agua potable obtenida en una hora. V , será el volumen que se requiere procesar para lograr para lograr el caudal esperado. En este caso, el volumen de trabajo serán 806 m³, por lo tanto, la energía necesaria en todo el proceso será de:

$$E_o = \frac{2,5 \text{ kWh}}{\text{m}^3} * 806 \text{ m}^3 = 2,01 \text{ MWh}$$

En consideración a que la actividad de Ósmosis Inversa se realiza aplicando alta presión, y apoyados en la en los rendimientos tipo de la Tabla 4, se estima una eficiencia de la Bomba de alta presión de 88%, por lo tanto, la energía real que se necesita para la OI es de:

$$E_o = \frac{2,01 \text{ MWh}}{0,88} = 2,28 \text{ MWh}$$

	Rendimiento tipo	Círculo primario	Círculo recuperación
Entrada de energía en la red		100,0	1,3
Motor eléctrico	96,0%	96,0	
Bomba alta presión	88,0%	84,5	
Pérdidas en circuitos y membranas	97,5%	82,4	
Conversión OI	45,0%	37,1	
Energía residual salmuera			45,3
Cámaras isobáricas	95,0%		43,0
Presión residual cámaras	98,6%		42,4
Booster	80,0%		43,5
Presión residual salida producto	98,6%	36,5	42,9
TOTAL	78,4%	36,5	42,9

Estevan / Sánchez-Colomer

Tabla 4. Rendimiento tipo en Plantas nuevas de desalación.

4.2.2. Energía del equipamiento asociado al proceso de Ósmosis Inversa (OI)

En el caso de la energía del equipamiento asociado al proceso general, se considerará el uso de elementos que trabajarán con un caudal de proceso de 2000 m³/h para que sea procesado en la etapa de OI. Estos se describen a se describe a continuación.

[1] Bombas Centrífugas Elevadoras.

Las bombas estarán dimensionadas para tomar el agua de mar que ingresa a los depósitos de almacenamiento y sea elevada a los procesos de pretratamiento. En este caso, se estima que, para asegurar el volumen de líquido esperado, se deberá realizar la instalación de los tanques de almacenamiento a unos 30m por debajo del nivel del mar con el fin de asegurar una columna de agua de mar suficiente para obtener el volumen de trabajo esperado



Ilustración 1. Funcionamiento de una planta desalinizadora.

Ilustración 1: Tomado de artículo: Desalinizar en zonas remotas: proyecto de desconexión de una planta desalinizadora en Cuba. <https://www.smartgridsinfo.es/comunicaciones/comunicacion-desalinizar-zonas-remotas-proyecto-desconexion-una-planta-desalinizadora-cuba>

(tanque virtual de 30m. x 30m. x 53,3m.). El agua almacenada se tomará a una altura promedio de 15m para tomar el 50% del agua, de tal forma que, por presión hidrostática, ingrese el agua de mar necesaria para su procesamiento.

El equipamiento de elevación de agua deberá empujar el agua a la superficie que estará a una altura de 15m desde de los tanques subterráneos. Se considera que las bombas elevarán el agua de mar a una presión de 10 psi con una carga de uso máxima de trabajo con el fin de aprovechar su rendimiento máximo. En este caso se trabajará con bombas que pueden entregar un caudal máximo de 1000 m³/h.

La Potencia nominal de un motor (PN): se indica en la placa de cada motor. Para el caso particular, el motor que utilizará la bomba será de 3HP con una Potencia de 2,2kW y una eficiencia del 89,5%. Se espera incluir variadores de velocidad para optimizar la operatividad de las bombas. En este caso no se considerarán.

I Especificaciones técnicas

Caudal máximo	1000 m ³ /h	4403 US GPM
Altura diferencial máx.	90 mcl	295 ft
Presión máxima trabajo	10 bar	145 PSI
Tª máx. trabajo	-10 °C a +120 °C (EPDM)	14 °F a 248 °F
	+140 °C (SIP, máx. 30 min)	284 °F
Velocidad máxima	1750 rpm	
	3600 rpm (modelo 125-100-250/2)	



Tabla 5. Especificaciones técnicas Bomba elevadora

Cálculo de Potencia Eléctrica para una Bomba Centrífuga. En este caso elevaremos el agua desde una altura de 15m, sin embargo, las bombas seleccionadas podrán trabajar con una altura máxima de nivel de agua de 25m. Por lo tanto, según la selección de la bomba, la potencia de trabajo de este elemento con un rendimiento del 89,5% es de:

$$P(kW) = \frac{2,2kW}{0,85} = 2,45 kW$$

El diseño incluye 3 bombas elevadores de 1000m³/h cada una. En operación siempre estarán dos unidades y una tercera servirá en condiciones de Backup o por mantenimiento de alguna de las otras dos. Se plantea iterarlas para que el desgaste de elementos sea equitativo. En consideración a que se utilizarán dos bombas de elevación su consumo promedio estará en los **4,9 kWh**.

[2] Etapas de Pretratamiento.

En este paso se retiran la mayor cantidad de elementos sólidos de gran tamaño a través de filtrado, ultrafiltrado o hiperfiltrado.

Filtros de Cartucho. Son utilizados para retirar las partículas grandes de materiales en el agua. Son equipos de fácil mantenimiento y su vida útil se estima de tres a diez años. Estos elementos incluirán una etapa de control automático para asegurar el caudal de proceso. Cada filtro tiene un caudal de servicio máximo de 175 m³/h y utiliza 1 HP aproximado en su operación. En este caso se considerará un arreglo de 12 filtros MF-1100 como referencia. Se tendrá un consumo promedio de **8,94 kWh** (12* 1HP, 1HP = 0,745kW).

Sistemas de Purificación del Agua. Están pensados para reducir el cloro y el total de Sólidos en suspensión (TSS). Dirigen los contaminantes a otra etapa de filtración (Manganeso y la turbidez). Filtros de 806 GPM pico, que equivale a 183 m³/h y utiliza 1 HP aproximado en su operación. En este caso tendrán un consumo promedio de **8,94 kWh**.

[3] Sistema de Ósmosis Inversa. Será el equipamiento más importante del proceso, ya que será el encargado de realizar la ósmosis inversa (OI) para retirar las sales del agua resultante de los procesos

anteriores. Según la especificación técnica de un equipo en particular, se menciona que para obtener 2500 m³/día de agua de permeado, es decir, 104,2 m³/h se requerirá de un motor equivalente a 350HP trabajando a 1000 RPM, con lo cual, para obtener el caudal planeado se necesitarán 8 unidades de estas. Llevando este dimensionamiento al consumo necesario, puede inferirse que se tendrá un consumo energético promedio de 2,08 MWh (350HP*0,745kW*8), que en comparación a los promedios industriales no es muy lejano a lo propuesto originalmente. Para el caso puntual se seguirá trabajando de acá en adelante con **2,08 MWh**.

El efecto de la ósmosis arrojará dos productos resultantes, el agua pura desmineralizada y el agua con sales concentradas o simplemente llamada como salmuera. Estas salmueras resultantes pueden ser depositadas nuevamente al mar, aunque estudios recientes demuestran que no es una práctica recomendable.

[4] Etapas de Postratamiento.

Durante las etapas de postratamiento se trabajará con aguas pobres en minerales que deberán tener un proceso potabilización para el consumo humano. En estos procesos se tratará con el caudal de salida de la desalinizadora, es decir, que tendremos un caudal de trabajo de 806 m³/h de agua sin procesar.

Sistema de Intercambio Iónico. Está propuesto para producir agua ultrapura. Es un proceso que puede realizarse de manera química o eléctrica. Es un proceso que se realiza después de la ósmosis inversa. Este elemento hace su operación haciendo uso de un voltaje de 12VDC, con lo cual su consumo es bajo o casi nulo. Maneja un caudal bastante bajo con lo cual se deberá solicitar un diseño a la medida. El caudal de trabajo es de 1,25 GPM equivalentes a 0,28 m³/h, por lo tanto, se necesitarán alrededor de 2878 unidades.

Sistema de Esterilización por rayos UV. Es usado para retirar cualquier tipo de bacteria. No usa productos químicos y no afecta el sabor del agua. Este equipo cuenta una relevancia considerable con relación en la cantidad de energía requerida para su operación, se tiene que es un elemento que necesita alrededor de 2,4 kWh para un caudal de 1380 GPM equivalente a 313 m³, por lo cual, para suplir el caudal esperado, se deberá hacer uso de 3 equipos con un consumo total de **7,2 kWh**.

Sistema de Limpieza de Membranas. Están propuestos para ampliar la vida útil de las membranas permitiendo ahorrar dinero en la inversión de membranas nuevas. Este equipo será útil cuando la producción del sistema de OI haya caído por lo menos un 10%, o la presión diferencial aumente un 15%. El sistema de limpieza contará con 2 equipos, uno en operación y uno de Backup. Se estima que deberán limpiarse 6 membranas diarias. Se considera esa proporción debido a que se manejarán alrededor de 864 membranas que deberán limpiarse a los 6 meses de uso aproximadamente. Sumado a lo anterior se deberá tener un recambio de membranas de un 10% al año. El consumo del equipamiento de limpieza es de **0,745kWh** (1*1HP, 1HP = 0,745kW).

[5] Recuperación de la Energía.

Durante el proceso de desalinización es posible recuperar parte de la energía utilizada, más específicamente en la etapa de OI. Es posible considerar que la presión de la salmuera resultante puede ser turbinada para obtener parte de la energía utilizada. A este tipo de procesos se le denomina Sistemas de intercambio de presión. Este y otros procesos pueden ser usados, pero no serán motivo de exposición del presente documento.

4.2.3. Cuadro Resumen Consumo Eléctrico:

Equipo	Cantidad	Referencia	Capacidad (m ³ /h)	Voltaje	Consumo de Energía (Aprox.)
Bombas Elevadoras 3 HP.	2	200-150-250	1000 c/u	208-230/460V 60/50Hz	2,45kWh*2 = 4,9 kWh
Filtros de Cartucho. (Filtración Media)	12	MF-1100	175 c/u	115V/1ph/60Hz	0,745kWh*12 = 8,94 kWh

Sistema de Purificación de agua (Filtración Media)	12	MLF86-A-F	183 c/u	115V/1ph/60Hz	0,745kWh*12 = 8,94 kWh
Desalinizadora (Ósmosis Inversa)	8	SW-660K-18880	104,2 c/u	380-600V 50 – 60Hz	2,08 MWh ⁶
Sistema de Intercambio Iónico.	2878	RCS-20BB	0,28 c/u	-	-
Sistema de Esterilización por rayos UV	3	SUV-1380	313 c/u	100-240V/50-60Hz	2,4kWh*3 = 7,2 kWh
Sistema de Limpieza de membrana	1	CS8-6	--	220V/1Ph/60Hz 460V/3Ph/60Hz	0,745kWh*1 = 0,745kWh
Sistemas Generales de la planta (11.00m ²). Incluye: iluminación, aire acondicionado de oficinas y automatización, entre otros.	1	Gl.	--	-	1 kWh
Energía Neta ($E_N = E_O + E_E$)					2,11 MWh
Consumo Eléctrico por año (8760h).					18,5 GWh

Tabla 6. Resumen Consumo Eléctrico

Membrana por utilizar.

Las membranas semipermeables jugarán un papel muy importante en el producto resultante y en la cantidad de energía necesaria para el proceso. La selección de la membrana se realizó en consideración al caudal permeado por estas y a la presión requerida en su proceso de OI, sin embargo, las condiciones que aseguren el caudal esperado pueden reducir el permeado de otros elementos como por ejemplo el porcentaje de Boro. La siguiente es una lista de membranas con las que se podrá trabajar.

Especificaciones

Producto	Área activa ft ² (m ²)	Presión de Rendimiento esperado de funcionamiento psig (bar)	Caudal de permeado GPD (m ³ /d)	% de rechazo de boro estabilizado	% de proyección de sal estabilizada
SW30ULE-440i	440 (41)	1.200 (83)	12.000 (45,4)	89	99,7
TM820V-440	440 (41)	1.200 (83)	9.900 (37,5)	92	99,8
RO S440 HF	440 (40,9)	1.200 (83)	9.900 (37,5)	92	99,8

Tabla 7. Membranas comerciales que utilizar.

Los fabricantes de membranas recomiendan que es importante realizar un mantenimiento y limpieza después de un periodo de uso, ya que pueden conservar el elemento y en otros casos pueden aumentar su vida útil.

⁶ El estimado de energía resultante del análisis del proceso de OI será el utilizado para el dimensionamiento de la planta.

4.3. Dimensionamiento del Sistema Eléctrico.

El proyecto de desalinización estará planeado para ocupar un área total de 10.000m² (una hectárea). El mismo estará ubicado a la orilla del mar, con el fin de tener un acceso a las tomas de alimentación de agua de mar, a su vez, se busca que esté lo más cerca a la población a la que se le suministrará el agua potable.

El desafío más importante que tiene este tipo de implementaciones es el consumo energético, es por ello que el dimensionamiento del mismo preliminarmente será un sistema híbrido asistido por red que trabajaría en función de tres fuentes principales de energía: en primer lugar, estaría la generación eólica que como se ha visto en varios casos de estudio es una tecnología muy prometedora dentro de las energías renovables con el objetivo de desalinizar agua de mar por OI⁷; una segunda fuente de alimentación será la fotovoltaica, que en este caso puntual su producción estará asociada al equipamiento que acompaña el proceso de OI, es decir, que será usada en los procesos de bombeo de elevación de agua de mar, filtrado y purificación, servicios generales, entre otras; y una tercer fuente de energía, será haciendo uso de las líneas de alimentación de red tradicionales, este último sistema será complementario a las otras dos.

Se considera que la selección de elementos necesarios para la producción son equipos de alto rendimiento, por lo tanto, su dimensionamiento y selección de componentes será de gran importancia para lograr el objetivo. Cada uno de los elementos estará pensado para que el consumo en energía sea óptimo en su uso. Es por ello por lo que el sistema deberá incluir en su diseño estrategias de ahorro máximo de energía, como por ejemplo incorporar variadores de velocidad para que el arranque de los motores se realice de forma suave y progresiva de tal manera que la energía necesaria para su operación sea mínima y pueda tenerse un ahorro en su uso. Otra opción será pensar implementar las nuevas tecnologías de membranas en las que se utilizan materiales que requieren menor presión y por ende menor energía en la producción de agua potable.

Una estrategia que puede tener éxito en el futuro es buscar el almacenamiento de energía haciendo uso del agua potable producida. Se pensaría en utilizar el agua producida para que fuera bombeada a una altitud superior y de esta manera almacenarla en energía potencial. La Serranía de Carpintero, lugar que se encuentra a unos 21,8 km del punto de producción y que tiene una altura máxima de cerro de 172m, podría ser un lugar donde podría fabricarse un reservorio de mayor altura. En este caso se pensaría en realizar una ampliación del sistema de generación por energía renovables para que realicen el bombeo correspondiente y de esa manera utilizar la energía potencial de la columna de agua en los momentos en que se requiera energía extra o en su defecto para ir reduciendo el uso de las líneas de alimentación convencionales. Una vista más ambiciosa al tema de almacenamiento, podría ser la producción de hidrógeno, sin embargo, estos dos casos se verán en una revisión posterior y no se considerarán en este proyecto.

4.3.1. Diseño Planta a partir de Energía Eólica

A partir de los datos de viento obtenidos de la estación meteorológica del Aeropuerto Puerto Bolívar (ver Anexo 2), ubicado en cercanía al punto de trabajo, se estima que la zona del Carrizal puede contar con un potencial eólico favorable para suplir la demanda de energía en la desalación de agua de mar.

Nombre Estación	Latitud	Longitud	Altitud
AEROPUERTO PUERTO BOLIVAR - AUT [15075501]	12,22430556	-71,98288889	10

Tabla 8. Datos Estación Meteorológica.

Con la información de velocidad de viento obtenida, se obtuvieron los siguientes parámetros de potencial eólico, a partir de estos se busca el aerogenerador adecuado.

⁷ Fuente: Qingfen Ma, Hui Lu. Tecnologías de Energía Eólica integrada con sistemas de desalinización: Revisión y estado del arte.

	Altura de Buje	Valor medio del cubo de las Vel $\langle v^3 \rangle$	Densidad del aire (ρ)	Densidad de potencia eólica [W/m ²]
$\langle v_{10} \rangle$	10	1015,59	1,0692	542,93
$\langle v_{60} \rangle$	60	2435,31	1,0629	1294,22
$\langle v_{65} \rangle$	65	2532,77	1,0622	1345,21
$\langle v_{70} \rangle$	70	2626,51	1,0616	1394,17
$\langle v_{75} \rangle$	75	2716,93	1,0610	1441,31
$\langle v_{80} \rangle$	80	2804,35	1,0604	1486,81
$\langle v_{85} \rangle$	85	2889,06	1,0597	1530,81
$\langle v_{90} \rangle$	90	2971,29	1,0591	1573,45
$\langle v_{95} \rangle$	95	3051,25	1,0585	1614,83
$\langle v_{100} \rangle$	100	3129,11	1,0578	1655,06
$\langle v_{105} \rangle$	105	3205,04	1,0572	1694,22
$\langle v_{110} \rangle$	110	3279,16	1,0566	1732,37
$\langle v_{115} \rangle$	115	3351,61	1,0560	1769,60
$\langle v_{120} \rangle$	120	3422,48	1,0553	1805,95

Tabla 9. Parámetros Potencial Eólico

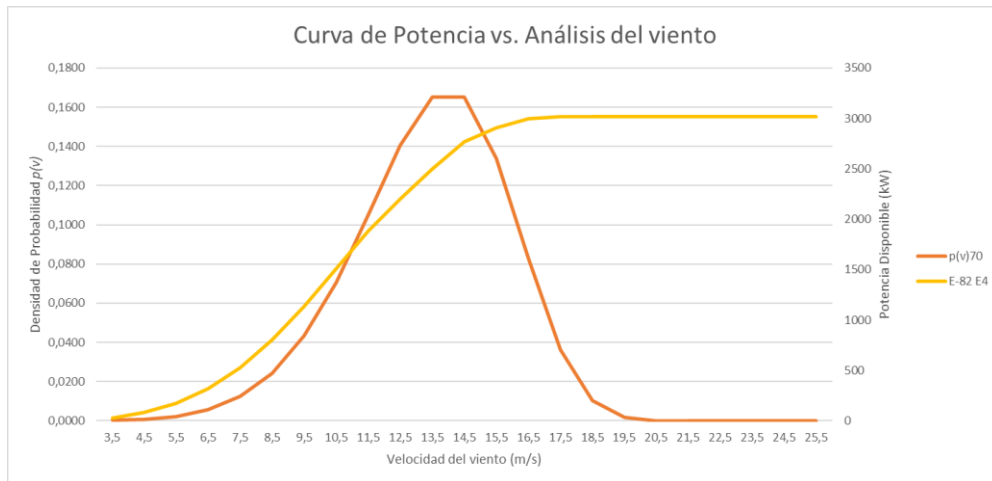
Para la selección del aerogenerador se tuvo como criterio básico que la velocidad disponible máxima (V_{mp}) obtenida a las alturas de eje exigidas por el fabricante, estuviera lo más próxima a la velocidad nominal de la siguiente lista de aerogeneradores que cumplen con esta característica, que para este caso serían: v_{70} , v_{80} y v_{90} . El siguiente es un cuadro de los aerogeneradores comparados:

	GE Energy	Enercon	Enercon	Gamesa	SUZLON
	1.5sle	E-82 E2	E-82 E4	G80-2.0 MW	S88 - 2.1 MW
Potencia kW	1500	2300	3000	2000	2100
Velocidad Nominal del viento (m/s)	14	14	15	15	14
Velocidad de Arranque (m/s)	3,5	3	3,5	4	4
Velocidad de Corte (m/s)	25	28	31	25	25
Diámetro del Rotor (m)	77	82	82	80	88
Altura del Eje (m)	65/80	78/84/85/98/108/138	69/78/84	60/67/78/100	80/100
Clasificación (m)	IIA	IEC/EN IA	IEC/EN IA IEC/EN IIA	IA/WZII/WZIII	IIA

Tabla 10. Consolidado de Posibles Aerogeneradores a utilizar.

Para el caso puntual se hizo un análisis en función de las densidades de potencia eólica y de las curvas de potencia de cada aerogenerador obteniendo que el generador que presentará un mejor desempeño en la acción del viento es el generador eólico Enercon E-82 E4 de 3 MWh con el que se podrá obtener una energía total por año de **19,28 GWh** si se instala a una **altura de eje de 70 metros**. El potencial eólico a esta altura se determina según el Anexo 3 en el que se refleja el análisis realizado para la obtención de la potencia generada en un año.

Este generador bajo las condiciones de viento ofrece un rendimiento Estacionario (η_{Est}) de **0,30** y un Factor de Carga **FC de 0,73**, valores que se encuentran dentro de los rangos estimados como favorables en la generación energía eólica. La Ilustración 2 muestra el resultado obtenido.



η_{Est} : 0,3
FC: 0,73

Ilustración 2. Curva de Potencia de aerogenerador vs. Análisis de viento

El sistema de generación a través de energía eólica hará uso de una única turbina que entregará el suministro de energía suficiente para que pueda cubrir la demanda de la planta de desalinización en un 100%. Adicionalmente al cubrimiento de la demanda, la producción eólica proyectada entregará un excedente eléctrico que puede ser inyectado a la red eléctrica del lugar y de esa manera poder amortizar costos o también podrá almacenarla para uso posterior en otras tareas. Este tipo de sistemas se proyectan con una vida útil de 20 años aproximadamente, y puede llegar a ser mayor en consideración a las condiciones de viento, es decir, condiciones favorables evitarán posibles fatigas y esfuerzos del sistema, así como también una realización de mantenimientos puede prolongar aún más la vida útil de los elementos.

No obstante, se hace necesario evaluar otras tecnologías para encontrar un balance de inversión y contraprestación de energía para prolongar la vida útil de los sistemas. Se verá más adelante como el tema económico puede jugar un papel importante en la tecnología a implementar.

4.3.2. Diseño Planta a partir de Energía Fotovoltaica.

Para suplir la gran demanda de energía que se necesitan en la desalación, la instalación fotovoltaica hará uso de los techos de la planta que se estima en un área total utilizable de 9.304 m², la instalación aprovechará la inclinación de 12° que tiene el tejado que es coincidente con el ángulo de radiación máxima de sol durante el año. La infraestructura estará pensada para que la superficie del tejado de los diferentes edificios que se pudieran construir sea cubierta con placas solares, puede asumir costo mayor, sin embargo, al llevar una infraestructura perimetral, se aprovecha en mayor medida el área de trabajo sin que se afecte la producción por sombreado de las placas que pudieran estar a niveles de piso.

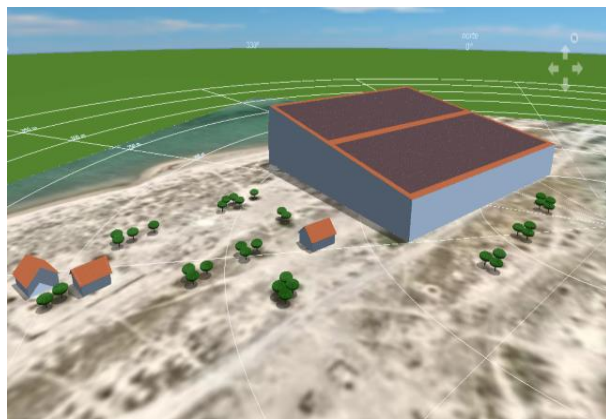


Ilustración 3. Vista del Proyecto con el sistema FV

Con el fin de aprovechar el área propuesta para la planta, la instalación FV contará con un arreglo de 3640 paneles solares de 540 Wp cada uno marca Yingli Solar distribuidas por todo el predio, de tal manera que ocupe la mayor cantidad de área disponible. Este tipo paneles cuenta con altos estándares de calidad y rendimientos y eficiencias favorables. En conjunto con las placas solares estarán trabajando 70 inversores de marca SMA America, inc. que son comercializables en Colombia también.

El sistema fotovoltaico tendrá una potencia instalada de **1965,6 kWp** con lo que se podrá cubrir 15,3% del consumo total de la planta, por eso será necesario evaluar la inversión en este caso.

El diseño fue realizado a través del software de simulación PV*SOL, el cual entrega la siguiente tabla de rendimientos:

Datos climáticos	Carrizal, COL (1991 - 2010)
Potencia generador FV	1965,6 kWp
Superficie generador FV	9.304,0 m ²
Número de módulos FV	3640
Número de inversores	70

*Tabla 11. Datos Climáticos simulación PV*SOL*

PV*SOL estimó una radiación solar bajo los siguientes parámetros:

Datos climáticos	
Ubicación	Carrizal, COL (1991 - 2010)
Resolución de los datos	1 h
Modelos de simulación utilizados:	
- Radiación difusa sobre la horizontal	Hofmann
- Radiación sobre superficie inclinada	Hay & Davies

Tabla 12. Datos Climáticos utilizados

Por otro lado, los datos de consumos incluidos al software fueron los siguientes:

Consumo	
Consumo total	18498711 kWh
Bombas Elevadoras (2 uni.)	42924 kWh
Filtros de Cartucho (12 uni.)	78314 kWh
Sistema de Purificación (12 uni.)	78314 kWh
Desalinizadora (8 uni.)	18220800 kWh
Sistema de Esterilización (3 uni.)	63072 kWh
Sistema de Limpieza (1 uni.)	6526 kWh
Almacén 11000 m ² (con climatización); fuente 3	8760 kWh
Pico de carga	2113,9 kW

Tabla 13. Parámetros de Consumo

Con el análisis realizado por el software, se obtuvieron los siguientes resultados:

Instalación FV	
Potencia generador FV	1965,6 kWp
Rendimiento anual espec.	1.440,30 kWh/kWp
Coefficiente de rendimiento de la instalación (PR)	82,2 %
Reducción de rendimiento por sombreado	0,0 %/Año
Energía de generador FV (Red CA)	
Consumo propio	2.831.057 kWh/Año
Inyección en la red	0 kWh/Año
Limitación en el punto de inyección	0 kWh/Año
Proporción de consumo propio	100,0 %
Emisiones de CO ₂ evitadas	1.330.597 kg / año
Consumidores	
Consumidores	18.498.711 kWh/Año
Consumo Standby (Inversor)	311 kWh/Año
Consumo total	18.499.022 kWh/Año
cubierto mediante energía fotovoltaica	2.831.057 kWh/Año
cubierto mediante red	15.667.971 kWh/Año
Fracción de cobertura solar	15,3 %

Tabla 14. Resultados del Sistema Fotovoltaico

A partir de estos valores obtenidos puede observarse como los rendimientos son realmente altos, sin embargo, no logra cubrir sino el 15,3% del consumo total de la instalación. Puede presumirse que el sistema además de los 2,83 GWh/año que produce, tendrá unos excedentes durante los días de mayor irradiancia, pero no va a ser suficiente para cubrir una proporción mayor a la estimada.

A simple vista el consumo fuerte debería ser suplido por un sistema principal, bien sea por suministro eléctrico convencional o por energía eólica. Puede decirse que el sistema FV no tendría la capacidad de cubrir la demanda por sí solo, con lo cual, el sistema FV puede ser un complemento a la demanda de energía diaria. El sistema FV puede plantearse como plan de emergencia al sistema eólico cubriendo una porción de la producción y apoyado en el sistema convencional o por paradas de mantenimiento al sistema principal.

Sin embargo, habrá un momento en que el consumo energético no puede ser cubierto con ninguno de los dos sistemas de energías renovables (FV y Eólico), con lo cual, el sistema será capaz de acudir a la red eléctrica convencional para que entregue la energía que se precise en el momento de la producción diaria.

Se observa también que toda la energía FV generada será consumida por el sistema de desalinización y comprenderá un ahorro en emisiones de 1326 toneladas CO₂ al año.

4.3.3. Resumen de Cobertura de la Demanda Energética.

Una implementación de un *sistema híbrido asistido por red*, es decir, el trabajo conjunto de las dos energías renovables y asistido por la red convencional, puede hacer viable la generación energética para este tipo de proyectos. En el siguiente resumen están los resultados obtenidos.

	Consumo	Generación	Excedentes
Energía demandada al año (GWh/año)	18,5		
Energía Eólica (GWh/año)		19,28	
Energía FV (GWh/año)		2,83	
Totales	18,5	22,11	
Excedente de Energía [Generación - Consumo] (GWh/año)			3,61

Tabla 15. Resumen de la Cobertura de la Demanda Energética.

A simple vista, el sistema por energías renovables es 100% autosostenible haciendo uso únicamente de la energía eólica, sin embargo, en el caso de que el sistema quede expuesto a una contingencia, el mismo deberá estar asistido primeramente por el sistema fotovoltaico y después por la red eléctrica convencional. Según esta lógica pueden existir los posibles escenarios de operación:

	Normal		Alta Demanda		Fallo Renovables		Mantenimiento	
	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
Energía Eólica	●		●			●		●
Energía FV		●	●			●	●	
Energía de Red		●		●	●		●	

Ilustración 4. Escenarios de producción Sistema Asistido por Red.

Normal: el sistema funciona bajo los parámetros de diseño.

Alta demanda: el sistema puede requerir una mayor energía para bombeo de almacenamiento o en el caso de se modifican los parámetros de producción a un valor superior que da el GAP de los equipos.

Fallo de renovables: los sistemas de energía Eólica y FV quedan fuera de servicio. La operación será asistida por el sistema de red convencional.

Mantenimiento: el sistema eólico requiere un mantenimiento programado. Se apuntará a que el mantenimiento se realice en horas del día donde la irradiancia del sol suministre la energía suficiente para que la producción sea soportada por el sistema FV en su mayoría.

En su operatoria diaria, el sistema no hará uso de parte de la energía eólica generada y tampoco de la energía fotovoltaica, por lo tanto, podrá hacer uso de esa energía para otro tipo de utilidades, tales como:

- Energía para tratamiento de residuos (Salmuera).
- Vertido de energía a la red eléctrica del lugar con retribución en pago de esa energía.
- Suministro eléctrico para el equipamiento de bombas que llevan el agua a los lugares de destino.
- Almacenamiento de energía por bombeo hidráulico o en producción de hidrógeno.
- Suministro eléctrico a los habitantes vecinos del lugar. Un mayor sentido social.
- Producción de un mayor volumen de agua, incrementando la asignación a cada habitante con el fin de que su uso sea para riego de cultivos. Entre muchos otros usos.

5. Impacto ambiental en la Desalinización.

El agua de mar es un recurso abundante en la tierra con el que se pueden cubrir muchas necesidades de una población. Dentro de las necesidades que pueden existir está el uso de ella en la producción de agua de potable para consumo humano. Desalinizar puede ser la solución a la falta de agua en el mundo, pero para lograrlo existirán impactos positivos y negativos al medioambiente en su obtención.

Evidentemente, el mayor impacto ambiental positivo que tiene la desalinización de agua de mar es darle salida a otra forma de suministro hídrico de abastecimiento, logrando así, que los acuíferos de los que se acostumbraba a tomar agua se recuperen de manera natural para que perduren durante el tiempo.

Un impacto positivo que también tiene la desalinización, y más específicamente con la inclusión de las energías renovables, es la reducción de los gases de efecto invernadero que se dejarán de producir si se hace uso de fuentes de energía renovable en lugar de las fuentes fósiles que se venían usando para este fin.

Por otra parte, existen varios puntos que se deben tener en cuenta durante los procesos de desalinización, entre los cuales está:

5.1. Manejo de la Salmuera resultante.

Este es uno de los principales inconvenientes con la desalación. Es claro que para obtener un litro de agua pura se requiere 2,5 litros de agua de mar, con lo cual, una vez recuperado el litro de agua pura, existirá un 1,5 litro de salmuera resultante. Habitualmente la salmuera resultante se devuelve al mar bajo una serie de parámetros control con los que se evita el impacto al ecosistema, a través de estas técnicas se evitan concentraciones elevadas de sal que se pudieran dar al paso del tiempo, sin embargo, hay estudios que muestran que la concentración de sales ha ido aumentando considerablemente en zonas donde se ubican las plantas de desalación.

Para lograr que salmuera tenga manejo, en los últimos años se está incursionando fuertemente en la tecnología por Ósmosis Directa o Forzada por sus siglas en inglés (Forward Osmosis). Este tipo de tecnologías promete al futuro porque ya no necesitarían de alta presión para su proceso de desalinización, en su lugar, utilizarían calor, electricidad y la membrana semipermeable. Con la FO es posible obtener agua pura a partir de aguas con concentraciones mucho más altas que las aguas de mar.

Otra de las posibles salidas que puede tener la salmuera resultante estaría en la Acuicultura. En este caso se utilizarían las aguas con alta salinidad para disponerlas de manera controlada en cultivos de peces y animales acuáticos de consumo humano y que son recolectados habitualmente en lugares muy alejados y que hacen que su pesca sea peligrosa.

5.2. Manejo de residuos químicos.

Un segundo producto resultante de los procesos de desalinización son los residuos químicos que se necesitan para la limpieza de membranas principalmente y también para el tratamiento de algunos procesos de mineralización. Por lo tanto, este tipo de sustancias se deberán almacenar para darles un manejo especializado y de esa manera evitar su vertido directamente a las aguas cloacales.

Dentro de los residuos que pueden encontrarse durante todo el proceso están: metales pesados, fosfatos, cloruros, ácidos grasos, ácido sulfúrico, ácido málico y sulfuro de sodio; en su mayoría de origen antiincrustantes otros tensoactivos y otro que provocan corrosión.

5.3. Impacto a la fauna de los lugares.

Los aerogeneradores eólicos pueden tener un impacto considerable en las aves migratorias que pueden llegar a los lugares donde están instalados. Los giros frecuentes que tienen las aspas pueden llegar a golpear a las aves viajeras y a las propias del lugar, por lo tanto, durante la etapa de viabilidad se debe considerar este punto.

Otra de las consideraciones para tener en cuenta, es el sonido que provoca el giro de las aspas de los aerogeneradores, es por ello por lo que los parques eólicos se desarrollan en áreas que estén distantes de comunidades y de esa forma evitar el ruido molesto que pueden generar los equipos durante su operación.

Uno de los impactos ambientales que pueden producirse con la introducción de las energías renovables, son los relacionados con la extensión de tierra para la producción de energía eléctrica, ya sea fotovoltaica o eólica, generalmente este tipo de tecnologías demandan una gran expansión de tierra, por lo tanto, es necesario considerar este punto en cualquier implementación. En el caso puntual, La Guajira se presta para hacer instalaciones de gran extensión al ser áreas desérticas, sin embargo, se debe tener en cuenta este punto en la etapa de factibilidad.

6. Aspectos Económicos.

Cada vez con un ritmo mayor la generación energética convencional está girando hacia la inclusión de tecnologías de generación energética a partir de fuentes renovables. Las instalaciones que hacen uso de esta energía están viendo un retorno a su inversión en ahorros en el pago de la energía, así como en una posible oportunidad de negocio basado en la producción energética, otro de las posibles ventajas es que motiva a las personas a realizar un cambio en la perspectiva sobre el uso de recursos, por otro lado, se incentiva también a que con el uso de este tipo de tecnologías se ayuda a la descarbonización que aqueja el planeta hoy día.

En el caso puntual, los lugares remotos como Carrizal tienen unos recursos muy limitados por su dificultad de acceso y el abandono tradicionalmente de estas zonas, sin embargo, planes como la obtención de agua potable a partir de agua de mar haciendo uso de energías renovables, permite que este tipo de territorios tengan una mejor calidad de vida con el acceso al agua potable, es por eso por lo que es importante de analizar la viabilidad económica de este tipo de proyectos.

6.1. Costos de Inversión y Recuperación de la inversión.

En primera instancia, estos proyectos al tener sentido social deberán ser financiados por los gobiernos de turno, sin embargo, se planteará el escenario de costos necesarios para una inversión privada.

Partiendo de lo propuesto por Ziolkowska (2015) en su trabajo: es la desalinización asequible?, menciona en su texto que apoyado en las publicaciones de la GWI (Global Water Intelligence), denotan que la inversión en este tipo de soluciones se realiza en a través de tres grandes grupos, el primer grupo es la inversión inicial o llamada CAPEX y hace referencia a los costos de construcción de la planta los cuales se pagan una sola vez; después, vienen los costos de producción y operación que están asociados a suministros, planes de mantenimiento, uso de la energía, entre otros, estos costos son conocidos como OPEX, menciona Ziolkowska (2015) que los costos CAPEX y OPEX pueden ser muy variables según el país, o en casos en la misma región de instalación pueden tenerse costos diferentes; y por último, está el grupo de inversión asociado a los costos financieros haciendo referencia a la deuda y al capital invertido, este último lo menciona la GWI, aunque finalmente estos costos hacen parte de los costos OPEX.

Partiendo de este punto y basado en el estudio realizado por Caldera et al.: una estimación global, se podrá determinar de manera aproximada el costo de realizar una implementación en Carrizal, Guajira Colombia. En primer lugar, se propone que a partir del costo nivelado de la energía (LCOE) de fotovoltaica puede utilizarse para calcular el costo de producción para la desalinización de agua de mar, para ello se utilizarán las siguientes ecuaciones y tablas donde se soportarán los estimados propuestos por ellos.

$$LCOW_{desal} = \frac{(Capex_{desal} * crf_{desal} + Capex_{almac\ de\ agua} * crf_{alma\ de\ agua}) + opex_{fijos}}{Total\ de\ agua\ producida\ en\ un\ año} + Opex_{var\ desal} * SEC \quad (9)$$

Donde,

$LCOW_{desal}$: costo nivelado de agua desalinizada.

$Capex_{desal}$: inversión inicial de la planta. Estará dado en [€/m³].

crf_{desal} : factor de anualidad para la desalinización de agua de mar. [adimensional].

$Capex_{almac\ de\ agua}$: inversión inicial en los tanques de almacenamiento [€/m³].

$crf_{almac\ de\ agua}$: factor de anualidad para el almacenamiento del agua producto [Adimensional].

$opex_{fijos}$: costos opex fijos. Estará dado en [€/m³].

$Opex_{var\ desal}$ o $LCOE$: costos variables de desalinización o costo nivelado de la electricidad. Estará dado en [€/kWh].

SEC : energía específica consumida. Estará dado en [kWh/m³].

$$Opex_{fijos} = Opex_{fijos\ desal} + Opex_{almac\ de\ agua} \quad (10)$$

$$Opex_{var\ desal} = LCOE \quad (11)$$

$$crf = \frac{WACC * (1 + WACC)^N}{(1 + WACC)^N - 1} \quad (12)$$

Donde,

crf : factor de anualidad. Aplica para la desalinización o el almacenamiento.

$WACC$: costo promedio ponderado del capital.

N : tiempo de vida de la planta de desalinización o del almacenamiento de agua.

$$WACC = \frac{E}{E+D} * k_E + \frac{D}{E+D} * k_D \quad (13)$$

Donde,

E : inversión en euros (€).

D : deuda en euros (€).

k_E : coeficiente de retorno de la inversión.

k_D : coeficiente por el costo de la deuda.

La inversión del proyecto de desalinización se calcula basándose en la Tabla 16 propuesta por Caldera et al (2016), tomando como referencia los siguientes parámetros:

Key assumptions for the SWRO plant, water storage, and water transportation in the model for 2030 [28–33].

<i>SWRO desalination system</i>		
Capacity	m ³ /a	Equal to desalination demand of region
Capex	€/(m ³ ·a)	2.23
Fixed Opex	€/(m ³ ·a)	4% of Capex
Full load hours	hrs	System optimum
Energy consumption	kWh/m ³	Calculated for desalination site. Approximate range is 2.80–3.30. See Fig. 4
Lifetime	yrs	30
<i>Water storage</i>		
Capex	€/m ³	65
Fixed Opex	€/(m ³)	2% of Capex
Lifetime	yrs	30
<i>Horizontal pumping and piping</i>		
Horizontal pipes Capex	€/(m ³ ·a·km)	0.053
Horizontal pipes Fixed Opex	€/(m ³ ·a·100 km)	0.023
Horizontal pump Capex	€/(m ³ ·h·km)	19.23
Horizontal pump Fixed Opex	€/(m ³ ·h·km)	2% of Capex
Energy consumption	kWh/(m ³ ·h·100 km)	0.04
Lifetime	yrs	30
<i>Vertical pumping and piping</i>		
Vertical pipes Capex	€/(m ³ ·a·km)	0.053
Vertical pipes Fixed Opex	€/(m ³ ·a·100 km)	0.023
Vertical pump Capex	€/(m ³ ·h·m)	15.40
Vertical pump Fixed Opex	€/(m ³ ·h·m)	2% of Capex
Energy consumption	kWh/(m ³ ·h·100 m)	0.36
Lifetime	yrs	30

Tabla 16. Supuestos clave para una planta SWRO, almacenamiento y transporte de agua en un modelo para 2030 [Caldera et al. (2016)]

Con lo cual se obtienen los resultados en las Tabla 17 y Tabla 18 de resultados:

	Factor de Multiplicación	Producción	Total
Capacidad	8760 h año	806 m ³ /h	7.060.560 m ³ *año
Capex	2,23 €/m ³ *año	7.060.560 m ³ *año	15.745.048,8 €
Opex fijo	4%	15.745.048,8 €	629.801,9 €
Lifetime	-	-	30 años

Tabla 17. Resultados costos de producción obtenidos según los factores Caldera et al (2016).

	Factor de Multiplicación	Almacenamiento	Unidades
Capacidad	1 día	19.344 m ³	19.344 m ³ /día
Capex	65 €/m ³	19.344 m ³	1.257.360 €
Opex fijo	2%	1.258.465 €	25.147,2 €
Lifetime	-	-	30 años

Tabla 18. Resultados costos de almacenamiento obtenidos según los factores propuestos por Caldera et al (2016).

Con la tabla de resultados obtenida se podrá determinar el costo CAPEX de inversión propuesto para la planta con su respectiva capacidad de almacenamiento, resta analizar los precios asociados a la operación y mantenimiento, así como los costos por la energía necesaria de producción, por lo tanto, los costos OPEX fijos, serán analizados por cada tecnología utilizada por separado, así como una posible combinación de ellas. Partiendo de allí, se determinará el costo asociado a cada metro cúbico de agua pura obtenida.

Por otra parte, para el caso colombiano se utilizarán los coeficientes existentes en la herramienta libre GeoLCOE con el que se puede estimar los costos nivelados en la generación de electricidad (LCOE) para diferentes tecnologías de generación, principalmente las de fuentes renovables. En este caso para 2021, al parametrizar la herramienta con los valores obtenidos anteriormente, se llega a los siguientes valores propios de la interfaz y otros estimados como valores de trabajo:

$$k_E = 7,9\%.$$

$$k_D = 8,05\%.$$

Con estos valores y con un porcentaje de inversión del 40% de recursos propios y un 60% de recursos ajenos se obtendrán los valores WACC y demás parámetros con lo que se encontrará el costo nivelado para la desalinización del agua de mar. Se estima que la desalinizadora tendrá una vida útil de $N = 30$ años, por lo tanto:

E : Inversión desalinizadora: 16.799.928 €; Inversión almacenamiento: 1.258.465 €.
 D : Deuda desalinizadora (60% de E): 10.079.956,8 €; Deuda almacenamiento (60% de E): 755.079 €.

$$WACC = \frac{16.799.928}{26.879.884,8} * 0,079 + \frac{10.079.956,8}{26.879.884,8} * 0,0805 = 0,0795625$$

(El valor WACC aplica para los dos casos, desalinizadora y almacenamiento).

$$crf = \frac{0,0795 * (1 + 0,0795)^{30}}{(1 + 0,0795)^{30} - 1} = \mathbf{0,08846103}$$

En el caso de los costos opex variables, se hará referencia a los costos por la producción de la energía eléctrica que es igual al costo LCOE, que en el caso de Colombia el costo de la energía a la fecha es de 433,33 \$/kWh⁸ (0,096 €/kWh). Se deberá actualizar a la fecha en el momento de la evaluación. En el caso del valor SEC, se tomará de referencia el mismo estimado de la energía necesaria para obtener un m³ de agua potable y el producto entre estos dos valores será la relación entre el costo (€) de la energía por cada m³ de agua de producto.

	Costo Variables
Opex Var desal o LCOE	0,096 €/kWh
SEC	2,5 kWh/m ³
LCOE*SEC	0,24 €/m³

Tabla 19. Resumen costos variables

Finalmente, el costo nivelado por desalinización será:

$$LCOW_{desal} = \frac{(15.745.048,8€ * 0,088 + 1.257.360€ * 0,088) + (629.801,9€ + 25147,2€)}{7.060.560 m^3} + 0,24€/m^3$$

$$LCOW_{desal} = \mathbf{0,545 €/m^3}$$

6.1.1. Inversión Sistema de Energía Eólica.

En el análisis anterior en el que se determinó la energía necesaria en el proceso de desalinización, se observó también que la potencia requerida podría ser cubierta con el uso de un aerogenerador de **3000 kW**, con lo cual se realiza un planteamiento de los costos involucrados para ver su factibilidad económica.

Inversión Inicial:

Según Miguel Villarubia, menciona que: “por razones de economía de escala, el coste de unitario (coste del KW instalado), depende en gran medida de la potencia instalada, es decir de la potencia nominal de los aerogeneradores y del tamaño del parque”, en esa línea Villarubia dice que para 2010 se podía hacer un estimado en el que para instalaciones llave en mano que estén entre 10 a 100MW, se tienen valores entre 1000 a 1400 €/kW instalado y que para instalaciones pequeñas de unos cuantos

⁸ Tomado de: GOV.CO. Datos Abiertos. Tarifa industrial y comercial en Colombia. Mes de junio 2021. Referencia a precio del euro al 01 de junio de 2021.

kW el costo de su instalación de llave en mano va entre 3000 y 5000 €/kW. Sin embargo, con la actualización realizada por Caldera et al (2016), puede determinarse una mejora en los precios de los aerogeneradores actuales basados en la Tabla 20:

Costs and technical assumptions for PV, wind, battery and PtG hybrid power plants in 2030 [15, 36, 37].

Fixed-tilted PV plant		
Capex	€/kW	550
Opex	€/(kW·a)	1.5% of Capex
Lifetime	yrs	35
Single-axis tracking PV plant		
Capex	€/kW	620
Opex	€/(kW·a)	1.5% of Capex
Lifetime	yrs	35
Wind plant		
Capex	€/kW	1000
Opex	€/(kW·a)	2% of Capex
Lifetime	yrs	25
Batteries		
Capex	€/kWh	150
Fixed Opex	€/(kWh·a)	10
Lifetime	yrs	15
Efficiency	%	90
PtG		
Water electrolysis Capex	€/kW _{H2}	380
Water electrolysis Fixed Opex	€/(kW _{H2} ·a)	13
Efficiency	%	84
Lifetime	yrs	30
CO ₂ scrubbing Capex	€/kW _{SNG}	356
CO ₂ scrubbing Opex	€/(kW _{SNG} ·a)	14.24
Efficiency	%	78
Lifetime	yrs	30
Methanation Capex	€/kW _{SNG}	234
Methanation Opex	€/(kW _{SNG} ·a)	5
Efficiency	%	77
Lifetime	yrs	30
Gas storage	€/kWh	0.05
Efficiency	%	100
Lifetime	yrs	50

Tabla 20. Costos y supuestos técnicos para plantas híbridas de energía FV, Eólica, Baterías y PtG en el 2030 [Caldera et al. (2016)]

En referencia a estos parámetros aproximados de inversión se determinarán los costos CAPEX y OPEX de cada tecnología renovable, FV y Eólica. Inicialmente se analiza la energía eólica obteniendo los siguientes resultados.

	Factor de Multiplicación	Producción	Total
Capex	1000 €/kW	3000 kW	3.000.000 €
Opex fijo	2% [€/kW*año]	3.000.000 €	60.000 €
Lifetime	-	-	25 años

Tabla 21. Resultados de costos de Planta Eólica según los factores de Caldera et al (2016)

Para determinar el resto de los costos asociados a la instalación del aerogenerador, se recurre nuevamente a la herramienta ofrecida por el gobierno de Colombia GeoLCOE, a partir de ésta se obtienen los siguientes costos fijos y costos variables de generación de la energía.

Al igual que en el caso de la planta de desalación se tendrá un porcentaje de inversión del 40% con recursos propios y un 60% con recursos ajenos, con lo cual, se obtienen valores WACC similares a los anteriores ($k_E = 7,9\%$ $k_D = 8,05\%$). El factor crf será distinto en consideración a que la vida útil del aerogenerador es mayor, $N = 25$ años.

E : Inversión aerogenerador: 3.000.0000 €.

D : Deuda aerogenerador (60% de E): 1.800.000 €.

$$WACC = \frac{3.000.000}{4.800.000} * 0,079 + \frac{1.800.000}{4.800.000} * 0,0805 = 0,0795625$$

$$crf = \frac{0,0795 * (1 + 0,0795)^{25}}{(1 + 0,0795)^{25} - 1} = \mathbf{0,0933289}$$

En el caso de la producción a partir de energía eólica, se estiman los precios de la energía nuevamente con la herramienta GeoLCOE incluyendo en la simulación los parámetros semejantes a la instalación a desarrollar, obteniendo los siguientes resultados.

	Costo Variables
Opex Var Wind o LCOE	0,1308 €/kWh
SEC	2,5 kWh/m ³
LCOE*SEC	0,327 €/m³

Finalmente, el costo nivelado de la energía eólica en función de los m³ de agua de producto será:

$$LCOE_{wind} = \frac{(3.000.000€ * 0,0933 + 60.000 €)}{4.905.600 m^3} + 0,327 €/m^3$$

$$LCOE_{wind} = 0,396 €/m^3$$

6.1.2. Inversión Sistema de Energía Fotovoltaica.

En el caso de la energía fotovoltaica para proyectos de este tipo se estima una vida útil de unos 35 años con elementos de última generación, los mismos cuentan con una degradación aproximada del 92,5%, con lo cual, la inversión será proyectada para que sea recuperada con el precio de la energía que debería contratarse si se estuviera conectado a la red convencional durante la vida útil de la instalación.

En 2015 H. Sharon, K.S. Reddy menciona a otros autores quienes proponen que: la desalinización de agua salobres es la solución para lugares remotos: “Para ubicaciones remotas, Al-Suleimani y Nair encontraron que la unidad de OI alimentada con energía solar fotovoltaica de capacidad de 5m³/d con una vida útil de 20 años resultó ser más económica que la unidad de ósmosis inversa operada por diesel para la misma capacidad. El costo de la producción por m³ resultó ser de 8,68 USD y 6,52 USD para los sistemas de energía a partir de diesel y de FV, respectivamente”. Sin embargo, con la proyección realizada por Caldera et al (2016) para instalaciones al 2030 se puede tener un mayor número de años en la vida útil de las instalaciones.

Inversión Inicial:

Partiendo de este punto se verá como la energía fotovoltaica también puede ser una alternativa a la desalación de agua, sin embargo, deberá hacerse uso de un área muy amplia donde se deberá ubicar el proyecto solar y de esa manera poder obtener la energía necesaria. En el caso puntual de la desaladora de agua de mar en Carrizal con una instalación fotovoltaica de 1916,5 kWp en un área aproximada de **una hectárea** es posible obtener una producción anual de **2,76 GWh/año**, lo que quiere decir que, si se espera cubrir la demanda total de **18,5 GWh/año** a través de paneles solares de características similares a los propuestos inicialmente, se tendrá que hacer uso de un poco menos de **7 hectáreas** de superficie aproximadamente, indicando a su vez un costo mayor de inversión inicial.

A partir de la Tabla 20, propuesta por Caldera et al (2016) se realizará un análisis de precios para la potencia a instalar. En este caso se hará una aproximación superior a la simulada anteriormente (ver Tabla 14) con el fin de cubrir la demanda exigida. Los costos también serán comparados con la instalación básica de la simulación para corroborar los valores de mercado.

Teniendo como referencia que para suplir la demanda del sistema de desalinización únicamente con paneles solares se hace necesario incrementar el área de la planta en casi siete veces a lo propuesto inicialmente, se trabajará con una potencia pico de 1965,6 kWp de una hectárea multiplicada por 7 veces esa misma área de producción, obteniendo una potencia pico total del parque de 13.759 kWp. A partir de estos parámetros aproximados, se determinarán los costos para la tecnología FV.

	Factor de Multiplicación	Producción	Total
Capex	550 €/kW	13.759 kWp	7.567.175 €
Opex fijo	2% [€/kW*año]	7.567.175 €	151.343,5 €
Lifetime	-	-	35 años

Tabla 22. Resultados de costos de Planta Eólica según los factores de Caldera et al (2016)

Para determinar el resto de los costos asociados a la instalación del aerogenerador, se recurre a la herramienta ofrecida por el gobierno de Colombia, GeoLCOE, encontrando los siguientes costos fijos y costos variables de generación de la energía.

Al igual que en el caso de la planta de desalación y la planta eólica, se tendrá un porcentaje de inversión del 40% con recursos propios y un 60% con recursos ajenos, con lo cual, se obtienen valores WACC similares a los anteriores ($k_E = 7,9\%$ $k_D = 8,05\%$). El factor *crf* será distinto en consideración a que la vida útil de los paneles solares es mayor que los aerogeneradores, $N = 35$ años.

E: Inversión aerogenerador: 5.405.125 €.

D: Deuda aerogenerador (60% de *E*): 108.102,5 €.

$$WACC = \frac{7.567.175}{7.718.518,5} * 0,079 + \frac{151.343,5}{7.718.518,5} * 0,0805 = 0,0795625$$

$$crf = \frac{0,0795 * (1 + 0,0795)^{35}}{(1 + 0,0795)^{35} - 1} = 0,085422529$$

En el caso de la producción a partir de energía Fotovoltaica, se estiman los precios de la energía nuevamente con la herramienta GeoLCOE incluyendo en la simulación los parámetros semejantes a la instalación a desarrollar, obteniendo los siguientes resultados.

	Costo Variables
Opex Var FV o LCOE	0,14629 €/kWh
SEC	2,5 kWh/m ³
LCOE*SEC	0,36572 €/m³

Finalmente, el costo nivelado de la energía FV en función de los m³ de agua de producto será:

$$LCOE_{FV} = \frac{(7.567.175 \text{ €} * 0,0854 + 151.343,5 \text{ €})}{7.060.560 \text{ m}^3} + 0,36572 \text{ €/m}^3$$

$$LCOE_{FV} = 0,478 \text{ €/m}^3$$

6.1.3. Cuadro de Resumen Desalinización con Fuentes Convencionales y con Fuentes de Energía Renovables FV y Eólica.

Con los valores obtenidos para desalinizar agua de mar a partir utilizando los precios de la energía de fuentes de generación convencional, se deberá analizar el precio de la desalinización haciendo uso de fuentes renovables Eólica y FV para determinar los posibles escenarios de inversión.

En el análisis de desalinización se obtuvo un precio de agua potable de **0,5422 €/m³** con un costo de energía de **0,24 €/m³**, lo que indica que si descuenta este último se dirá que el precio de desalinizar agua de mar incluyendo la planta es de **0,3022 €/m³**, con lo cual, al analizar cada fuente de energía por separado se tiene la Tabla 23 de resumen.

	Costos Producción	Energía Convencional (LCOE)	Energía Eólica (LCOE _{Wind})	Energía FV (LCOE _{FV})	Total
Desalinización con Energía Convencional.	0,3057 €/m ³	0,24 €/m ³	-	-	0,5422 €/m ³
Desalinización con Energía Eólica.	0,3057 €/m ³	-	0,375 €/m ³	-	0,680 €/m ³

Desalinización con Energía Fotovoltaica.	0,3057 €/m ³	-	-	0,478 €/m ³	0,784 €/m ³
Desalinización con Energía Eólica y FV.	0,3057 €/m ³	-	0,375 €/m ³	0,068 €/m ³ **	0,749 €/m ³

Tabla 23. Resumen para desalinizar agua de mar con diferentes formas de generación de energía

6.1.4. Análisis de Payback actualizado (PBA).

En el libro Ingeniería de Energía Eólica de Miguel Villarubia se propone un análisis simplificado con el que se podrá determinar la viabilidad de las inversiones de desalinización de agua haciendo uso de energías eólicas o fotovoltaica, con lo cual, en el análisis se trabajará con una serie de ecuaciones propuestas en su libro.

El Payback actualizado o tiempo de retorno de la inversión se denota bajo la siguiente ecuación, donde se suman los flujos de caja actualizados al año cero para estimar el tiempo en el que la suma de estos sea igual a la inversión inicial.

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j} \quad (14)$$

El flujo de caja (cash flow) requiere hacer una actualización al año cero de inversión, para ello se utilizan tres términos que involucran variaciones en los costos al paso del tiempo. Estos serán los mismos para evaluar las dos tecnologías de generación (Eólica y FV).

z: tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k: tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

r: tasa de interés compañías de financiamiento comercial. Según el Banco de la República de Colombia para inversiones superiores a 365 días como un CDT se considera en **4.09%**.

6.1.4.1. Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para la fuente de energía Eólica.

En el primer caso se analizará la tecnología eólica y se observarán los costos asociados ésta. Se parte por determinar el costo en el año cero definidos como:

$$CF_0 = (ING_0 - CT_0) \quad (15)$$

Donde,

CF₀: Costo Fijo en el año cero.

ING₀: Ingreso en el año cero. Hace referencia al valor por producción de energía en el año cero. La energía generada en un año multiplicada por el precio de la energía en Colombia (0,096€/kWh).

CT₀: Costos totales en el año cero = Costos (O&M) Operativos y Mantenimiento (13,4 €/MWh)¹⁰ + Costos Financieros.

$$CF_0 = \left(E [kWh] * \frac{0,096€}{kWh} - (OM_0 + FT_0) \right)$$

OM₀: costo Operativos y Mantenimiento en el año cero.

FT₀: costos financieros en el año cero.

** Se toma de referencia una séptima parte del precio de la desalinización con energía FV en consideración a que la solo se cuenta con una hectárea de planta.

¹⁰ Tomado del cálculo de costo LCOE para eólica a través de la herramienta GeoLCOE. Ver Anexo 4.

El costo O&M en el año cero se definen así:

$$OM_0 = (E [MWh] * Costo O\&M [€/MWh]) \quad (16)$$

La energía que se manejará en este caso es la energía obtenida a partir del factor de carga del aerogenerador seleccionado, con lo cual, con un FC de 0,73 indica que en el año se tienen 6394 h. a plena carga. Con la cantidad de horas y la potencia nominal del aerogenerador se obtiene la Energía a plena carga. Por lo tanto, la OM_0 resultante será:

$$OM_0 = \left(3 \text{ MW} * \frac{6394 \text{ h}}{\text{año}} * \frac{13,4€}{\text{MWh}} \right) = 257.070,96 \text{ € al año}$$

El costo financiero en el año cero se define de la siguiente forma, con $n=1$.

$$FT_0 = r * I * \left(1 - \frac{1}{(1+k)^n} \right) * \frac{1}{k} \quad (17)$$

I : es la inversión inicial que para el caso puntual se determina por el costo CAPEX de la planta de desalación con su respectivo almacenamiento y el costo de la energía Eólica como primera fuente de evaluación. Seguidamente se analizará con la fuente de energía renovables FV.

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048€ + 1.257.360€ + 3.000.000) * \left(1 - \frac{1}{(1 + 0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 800.566,12€$$

Por lo tanto, el Costo Fijo en el año cero será:

$$CF_0 = \left(19.184.400 \text{ kWh} * \frac{0,096€}{\text{kWh}} - (257.070,96€ + 800.566,12€) \right) = 784.065,31€$$

Finalmente, para saber cuál es el tiempo de retorno, se tiene que:

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

Con la aplicación de esta ecuación se observa que (ver Anexo 7) al finalizar el año 24 se obtiene un flujo de caja de 20.880.424,11 €, con lo cual el plan de retorno de la inversión estará concluido y a partir de ese punto se entiende que es utilidad pura.

Vida Útil:

Los sistemas eólicos se proyectan con una vida útil de 25 años aproximadamente, y puede llegar a ser mayor en consideración a las condiciones de viento, es decir, condiciones favorables evitarán posibles fatigas y esfuerzos del sistema, así como también una realización de mantenimientos puede prolongar aún más la vida útil de los elementos. Con lo cual este parámetro N , número de años que funcionará el aerogenerador, es fundamental para la proyección de la inversión a través del VAN.

Valor Actual Neto (VAN):

El Valor Actual Neto se define como la suma para los N años de vida de la instalación de todos los flujos de caja en unidades monetarias constantes actualizados al año cero menos la inversión. Se calcula a través de la siguiente expresión¹¹, y se da en unidades monetarias nominales (unm):

¹¹ Tomado del Libro de Miguel Villarubia López, Ingeniería de la Energía Eólica. Capítulo 11.

$$VAN = -INV + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+k)^j} = -INV + CF_0 \sum_{j=1}^N \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j} \quad (18)$$

En línea con los cálculos anteriores, se tiene (ver Anexo 8):

$$VAN = -20.002.408,8 + 26.646.112,69 = 6.643.703,88$$

Al obtener un valor de VAN positivo, puede decirse que la inversión en una instalación de energía eólica es rentable.

6.1.4.2. Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para la fuente de energía Fotovoltaica.

Al igual que con la energía eólica, la energía FV tendrá un análisis similar para obtener los costos asociados a la desalinización de agua de mar utilizándola como fuente de energía. Se parte por determinar el costo en el año cero definidos como:

CT_0 : Costos totales en el año cero = Costos (O&M) Operativos y Mantenimiento (28,74 €/MWh)¹² + Costos Financieros.

La energía Fotovoltaica que se manejará es la generada en un año de producción y se basará en los resultados obtenidos de la simulación anterior (ver Tabla 14). Para este caso la energía obtenida es de **2.831 MWh** que se producen en una hectárea, sin embargo, y como ya se mencionó anteriormente, la energía necesaria con la que cubriría la demanda requiere de 7 veces esa energía aproximadamente, por lo tanto, la energía de trabajo es de **19,81 MWh**. Por lo tanto, la OM_0 resultante será:

$$OM_0 = \left(19,81 \text{ MWh} * \frac{28,74\text{€}}{\text{MWh}} \right) = 569.552,04 \text{ €}$$

Al igual que el caso anterior, el costo financiero en el año cero se maneja la misma ecuación para FT_0 , con $n=1$ y $k=2,19\%$ (igual que en el caso anterior).

I : es la inversión inicial que para el caso puntual se determina por el costo CAPEX de la planta de desalación con su respectivo almacenamiento y el costo de la energía Fotovoltaica.

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048,8\text{€} + 1.257.360\text{€} + 7.567.175) * \left(1 - \frac{1}{(1 + 0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 983.360,38 \text{ €}$$

Por lo tanto, el Costo Fijo en el año cero será:

$$CF_0 = \left(19.817.399 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (569.552,04 \text{ €} + 983.360,38 \text{ €}) \right) = -194.005,07 \text{ €}$$

Finalmente, para saber cuál es el tiempo de retorno, se tiene que:

Al finalizar el año 35, que sería la vida útil de la instalación FV, se tiene un flujo de caja negativo de -7.851.990,016 (ver Anexo 9), con lo cual, el plan de retorno de la inversión NO será cubierto por las utilidades anuales y, por lo tanto, se puede inferir que no es una buena inversión.

Vida Útil:

Los sistemas FV de nuevas tecnologías se proyectan con una vida útil de 30 y 35 años aproximadamente, en consideración a la realización de mantenimientos periódicos que puede

¹² Tomado del cálculo de costo LCOE para energía FV a través de la herramienta GeoLCOE. Ver Anexo 4.

prolongar aún más la vida útil de los elementos. Con lo cual este parámetro N , número de años que funcionará el sistema FV, se realiza la proyección de la inversión a través del VAN.

Valor Actual Neto (VAN):

El Valor Actual Neto se define como la suma para los N años de vida de la instalación de todos los flujos de caja en unidades monetarias constantes actualizados al año cero menos la inversión. Se calcula a través de la siguiente expresión¹³, se da en unidades monetarias nominales (unm) y en línea con los cálculos anteriores se obtiene un VAN de:

$$VAN = -24.569.583,8 - 7.851.990,01 = -32.421.573,81$$

Al obtener un valor de VAN negativo, puede decirse que la inversión con una instalación de energía fotovoltaica NO es rentable.

6.1.4.3. Análisis de PBA y Valor Actual Neto (VAN) para una Combinación entre energía Eólica y energía Fotovoltaica.

Si se busca la desalinización de agua de mar a través de la incorporación de las dos tecnologías de energías renovables vistas, considerando que una sea complemento de la otra en casos de contingencia o por necesidad de una mayor producción, es posible que se conforme un sistema con energías renovables asistido por la red. De esa manera, en cuanto a costos y utilizando los mismos parámetros anteriores se tiene.

CT_0 : Costos totales en el año cero = Costos (O&M) Operativos y Mantenimiento Eólicos y FV de 13,4€/MWh y 28,74 €/MWh¹⁴, respectivamente + Costos Financieros.

En el caso de la energía Fotovoltaica se manejará la energía generada en un año de producción instalada en una hectárea de trabajo y se basará en los resultados obtenidos de la simulación anterior (ver Tabla 14). Para este caso la energía obtenida es de **2.831 MWh**. A ese valor se le incluirá la producción por el aerogenerador que está en **19.184,4 MWh**, por lo tanto, la energía de trabajo es de **22.015,4 MWh**. Por lo tanto, la OM_0 resultante será:

$$OM_0 = \left(22.015,4 \text{ MW} * \frac{42,14\text{€}}{\text{MWh}} \right) = 927.728,9\text{€}$$

I : es la inversión inicial que para el caso puntual se determina por el costo CAPEX de la planta de desalación con su respectivo almacenamiento y el costo de las dos energías Fotovoltaica y Eólica se tiene:

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048,8\text{€} + 1.257.360\text{€} + 3.000.000 + 1.081.080^{15}) * \left(1 - \frac{1}{(1 + 0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 843.834,71 \text{ €}$$

Por lo tanto, el Costo Fijo en el año cero será:

$$CF_0 = \left(22.015.457 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (927.728,9 \text{ €} + 843.834,71 \text{ €}) \right) = 341.917,80 \text{ €}$$

Para que finalmente conocer cuál es el tiempo de retorno, se tiene que al

¹³ Tomado del Libro de Miguel Villarubia López, Ingeniería de la Energía Eólica. Capítulo 11.

¹⁴ Tomado del cálculo de costo LCOE para energía FV y Eólica a través de la herramienta GeoLCOE. Ver Anexo 4 y Anexo 5. Costos nivelados de Generación de Electricidad a partir de Energía FV en Colombia.

¹⁵ Costo de la energía FV en una hectárea equivalente al tamaño de la planta de desalación.

Al finalizar el año 35, el plan de retorno de la inversión estará concluido con un flujo de caja de 13.838.479,27 € (ver Anexo 11), con lo cual, es un plan que NO es alcanzable, ya que no se logra cubrir la inversión inicial.

Vida Útil:

Los sistemas eólicos tienen una vida útil aproximada de 25 años que sería un primer tiempo de vida útil de los sistemas de inversión ya mencionados, por otro lado, las fuentes de energía FV de nuevas tecnologías se proyectan con una vida útil superior, de 30 a 35 años aproximadamente, en consideración a la realización de mantenimientos periódicos que puede prolongar su vida útil. Con lo cual el parámetro N , número de años que funcionará el sistema FV, será con el que se realizará la proyección de la inversión (VAN).

Valor Actual Neto (VAN):

El Valor Actual Neto se define como la suma para los N años de vida de la instalación de todos los flujos de caja en unidades monetarias constantes actualizados al año cero menos la inversión. Se calcula a través de la siguiente expresión¹⁶, se da en unidades monetarias nominales (unm) y en línea con los cálculos anteriores se obtiene un VAN de:

$$VAN = -21.083.488,8 + 13.838.479,27 = -7.245.009,53$$

Siendo el valor del VAN negativo puede decirse que la inversión NO es rentable, sin embargo, el sistema eólico estaría al límite de su vida útil y por tanto la rentabilidad sería nula o en este caso negativa.

Consolidado Final

Al analizarse las tres opciones para la desalinización de agua de mar a partir de energía convencional y a través de energías renovables como la energía eólica y fotovoltaica, se puede observar que la inversión inicial puede ser alta, pero el plan de retorno es accesible en el caso de la energía eólica con un tiempo de retorno largo y con un flujo de caja bajo.

El plan de retorno en la energía eólica en combinación entre eólica y FV, podría ser una alternativa de inversión, sin embargo, denota un riesgo mayor debido a que se llegaría al límite de la vida útil del aerogenerador, además que la inversión NO es recuperable en el paso del tiempo. Podría ser una alternativa favorable si se piensa en el bajo impacto ambiental en cambio del uso de energías convencionales. Además, al haber suplencia con energías renovables en las etapas de mantenimiento o falla, pueden ser favorable para la operación si se hace uso únicamente de la red convencional.

Por último, se observa que el si se piensa en una solución para desalar agua de mar haciendo uso únicamente de energía fotovoltaica, no es rentable debido al plan de retorno en referencia a la inversión inicial, sin embargo, podría reconfigurarse para que sea soportado por el sistema de energía convencional en los casos de mínima radiación solar o en la llegada de la noche.

Visto a grandes rasgos, una planta de desalación a través de fuentes renovables asistidas por red eléctrica convencional, puede ser una solución favorable para brindarle a la población Wayúu del territorio colombiano agua potable para su uso diario, basta con observar los beneficios que pueden ofrecerse a la población en cuanto a otras actividades económicas como la acuicultura, así como una posible explotación de los residuos generados durante el procesamiento del agua para mostrar cómo puede ser una solución que ofrecería una mejor calidad de vida a los territorios. A continuación, las conclusiones más relevantes del caso de estudio.

¹⁶ Tomado del Libro de Miguel Villarubia López, Ingeniería de la Energía Eólica. Capítulo 11.

7. Conclusiones

- Partiendo de los consumos diarios que tiene cualquier persona por derecho en el mundo (0,1m³/día), se plantearon dos caudales de trabajo. Un caudal de entrada de agua de mar y un caudal de salida con el agua pura como producto del proceso. El caudal de entrada será 2,5 veces mayor que el de salida, por lo cual, obtener 1m³/día de agua pura arroja como residuo 1,5 m³/día de salmuera con concentraciones de sales elevadas. El proyecto manejará los siguientes caudales:

Caudal de entrada: $48403 \frac{m^3}{día} = 2016,79 \frac{m^3}{h}$

Caudal de Salida: $19.344 \frac{m^3}{día} = 806 \frac{m^3}{h}$

Caudal de Salmuera (Residuo): $29.059 \frac{m^3}{día} = 1210 \frac{m^3}{h}$

- En comparación con los sistemas de desalación de agua de mar que realizan procesos físicos directos (destilación, congelación, evaporación relámpago, entre otras), los sistemas de membranas ofrecen un rendimiento mayor, debido a que sus procesos son más económicos en términos de energía eléctrica utilizada con la que se obtiene mejores resultados en términos de filtración de partículas.

Los sistemas de membranas son los más utilizados gracias a que retienen más partículas en función de la energía utilizada, de hecho, dentro del grupo de tecnologías que hacen uso de membranas, la ósmosis inversa es la que presenta mejores rendimientos con el uso de la energía. Esta tecnología viene fortaleciéndose con la investigación de membranas que incluye materiales como el grafeno o los nanotubos con los que será posible utilizar menos presión y por ende menores costos de operación.

- A partir del análisis realizado para obtener la cantidad de energía necesaria para poder retirar las sales existentes en el agua de mar, se determina que el sistema de OI requiere alrededor de 2,08MWh de energía neta y llevando ese valor a los consumos anuales se tiene un consumo de **18,5GWh/año** de toda la planta. Se analizaron los posibles escenarios con fuentes renovables eólica y fotovoltaica, dando como resultado que la energía eólica con un único generador puede suministrar la potencia suficiente para el proceso completo de desalinización. Resumen de los resultados.

	Consumo (GWh/año)	Generación (GWh/año)	Porcentaje de Cobertura de la demanda (%)
Energía demandada al año.	18,5		
Energía Eólica.		19,28	95,9%
Energía FV (Simulación).		2,83	15,3%

La demanda es cubierta por la turbina eólica y tendrá un excedente en producción que puede ser utilizados en otros procesos.

- El sistema por implementar será un *sistema híbrido asistido por red*, el cual opera a través de fuentes de energía diferente naturaleza, en este caso, la principal sería la energía eólica y estaría respaldada por la energía fotovoltaica; en el caso que la demanda sea mayor a la

entregada por los otros dos sistemas, la operación de desalación se realizará con la asistencia de la red convencional. Pueden existir los siguientes posibles escenarios de operación:

Normal: el sistema funciona bajo los parámetros de diseño.

Alta demanda: el sistema puede requerir una mayor energía para bombeo de almacenamiento o en el caso de se modifican los parámetros de producción a un valor superior que da el GAP de los equipos.

Fallo de renovables: los sistemas de energía Eólica y FV quedan fuera de servicio. La operación será asistida por el sistema de red convencional.

Mantenimiento: el sistema eólico requiere un mantenimiento programado. Se apuntará a que el mantenimiento se realice en horas del día donde la irradiancia del sol suministre la energía suficiente para que la producción sea soportada por el sistema FV en su mayoría.

- Proyectos de cultivos de peces a través de la acuicultura donde es posible hacer uso de las sales resultante, la producción de sal comestible o la incorporación de sales en temas constructivos civiles hacen que se tenga una salida favorable a las salmueras resultantes de los procesos de ósmosis inversa. El almacenamiento y tratamiento adecuado a los químicos resultantes en la limpieza de membranas o en la misma producción, son estrategias que deben ondearse con mayor fuerza en el futuro para darle buen uso a todos los derivados de la desalación de agua de mar.
- Uno de los puntos en contra que pueden tener las energías renovables es la necesidad de una gran cantidad de terreno para su producción, por lo cual, es necesario redoblar los trabajos por encontrar sistemas y materiales más eficientes que reduzcan el tamaño de los elementos recolectores de energía, si se consigue, puede hacer que la viabilidad en este tipo de energías sea aún más influyente de lo que ya viene siendo. Por otro lado, también deberán buscarse alternativas de almacenamiento de bajo impacto que consigan que la mayor cantidad de energía sea retenida de manera prolongada en el tiempo para hacer uso de esta en el futuro.
- En el caso que se quisiera realizar una producción íntegramente FV, demandaría tener una extensión del terreno cinco veces mayor a la prevista, con lo cual el impacto ambiental será mayor y puede ser una causal de negación del proyecto. Es indispensable analizar las posibles salidas a los temas de suplencia en ausencia de radiación solar, así como encontrar alternativas de almacenamiento de energía que no demande costos elevados y que su impacto al ambiente sea bajo.
- Partiendo de los precios de la energía que se manejan en Colombia, se dimensionó el sistema para que la desalación se realice a través de esta y de esa manera conocer el precio por m³ de producto (€/m³); a partir de ese punto, se evaluó el precio por m³ haciendo uso de la tecnología eólica y FV, encontrando que el precio más competitivo para desalar agua de mar más competitivo es haciendo uso de energía convencional, seguido por la energía eólica, luego la energía FV y finalmente una combinación de ambas.

	Costos Producción
Desalinización con Energía Convencional (LCOE).	0,542 €/m ³
Desalinización con Energía Eólica. (LCOE_{wind}).	0,680 €/m ³
Desalinización con Energía Fotovoltaica (LCOE_{FV}).	0,784 €/m ³
Desalinización con Energía Eólica y FV.	0,749 €/m ³

- Los planes de retorno o PBA que se observaron en cada uno de los casos de uso de la energía, determinaron que la desalación a partir de energía eólica tendría un retorno de la inversión a los 24 años de uso; mientras que en el caso de la energía FV el retorno de la inversión NO se alcanzaría a recuperar durante la vida útil del proyecto; en el caso de realizar una combinación de las dos tecnologías, utilizando únicamente una hectárea de planta para la producción FV, podría ser viable, sin embargo, su recuperación NO se daría durante los años de uso con el agravante que el tiempo vida útil del aerogenerador estaría limitado.
- La viabilidad económica determinada por el Valor Actual Neto (VAN), indica que haciendo uso de energía eólica la inversión es viable y rentable; en el caso de que la producción se realice únicamente con energía FV, el proyecto NO sería rentable, aunque podría hacerse un replanteo para determinar su viabilidad económica si se hace un complemento con el uso de la red convencional. Por último, si se plantea el uso en conjunto de la energía eólica y FV podría ser una inversión arriesgada, ya que la recuperación de la inversión estaría al límite de la vida útil del aerogenerador, por lo tanto, llevaría al extremo los elementos de generación eléctrica.
- El proyecto está planteado para que la inversión sea recuperada únicamente con los precios de la energía, sin embargo, el estudio no incluyó los ingresos que se pueden tener como resultado de la venta del agua como producto. Si se considera esta variable de ingreso, puede obtenerse una rentabilidad mucho más alta, con lo cual puede hacerse uso de cualquiera de las dos tecnologías o de la combinación de ambas. El siguiente sería un recálculo de la inversión con este ingreso anual (Ver Anexo 13).

	Precio del Agua	Producción de Agua	Ingresos por día	Ingresos por año
Ingreso por venta de agua en Colombia	0,48€/m ³	19344m ³	9470,58€	3.456.765,08€

	Inversión Inicial	Vida Útil	Flujo de Caja	PBA
Inversión con Energía Eólica	20.002.408,8 €	25 años	144.122.743,6€	5 años
Inversión con Energía FV	24.569.583,8 €	35 años	132.054.068,2€	8 años
Inversión con Energía Eólica y FV (en una hectárea)	21.083.488,8 €	25 años (vida útil del aerogenerador)	105.402.618,9€	6 años

- **Opciones de Mejora.**
 - Recalcular las bombas de elevación.
 - Recalcular el dimensionamiento del cuarto de bombas para su optimización.
 - Se pensaría utilizar tres piscinas de decantación que minimizarían los costos de filtrado y limpieza.
 - Suavizantes Industriales. Son los necesarios para retirar los iones peligrosos que puede tener el agua de mar, usualmente utilizado como un elemento de pretratamiento que a su vez sirve para conservar las tuberías y mejorar el sabor del agua retirando los metales existentes y sabor duro del agua. Este sistema puede ser incorporado al sistema, pero no es del todo necesario.

Bibliografía.

Bibliografía Científica.

- Bundschuh, J.; Kaczmarczyk, M.; Ghaffour, N.; Tomaszewska, B. (2021) State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. *Desalination*. 508: 115035.
- Caldera, U.; Bogdanov, D.; Breyer, C. (2016) Local cost of seawater RO desalination based on solar PV and wind energy: A global estimate. *Desalination*. 385: 207-216.
- Gude, V.G.; Nirmalakhandan, N.; Deng, S. (2011). Desalination using solar energy: Towards sustainability. *Energy*. 36 (1): 78-85.
- Ghalavand, Y.; Hatamipour, M.S.; Rahimi, A. (2015) A review on energy consumption of desalination processes, *Desalination and Water Treatment*. 54 (61): 526-1541
- Ma, Q.; Lu, H. (2011) Wind energy technologies integrated with desalination systems: Review and state-of-the-art. *Desalination*. 277 (1–3): 274-280.
- 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.
- Palomar, P.; Losada, I.J. (2010) Desalination in Spain: Recent developments and recommendations. *Desalination*, 255 (1–3): 97-106.
- Qasim, M.; Badrelzaman, M.; Darwish, N.N.; Darwish, N.A.; Hilal, N. (2019) Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459: 59-104.
- Ruiz Mateo, A. (2007) Los vertidos al mar de las plantas desaladoras. *Ambienta*, 62: 51-57. Disponible en:
https://www.miteco.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AM/AM_2007_62_51_57.pdf
- Sharon, H.; Reddy, K.S. (2015) A review of solar energy driven desalination technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 41: 1080-1118.
- Villarrubia, M. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. 1ª ed. Barcelona, España: MARCOMBO, S.A. 2012, 282 p. ISBN: 978-607-707-402-1. Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, mayo 2013. Trigésima cuarta reimpresión: Alfaomega Grupo Editor, México, marzo de 2020.
- Ziolkowska J.R. (2015) Is Desalination Affordable? - Regional Cost and Price Analysis. *Water Resources Management*. 29: 1385–1397

Páginas Web.

- Asema. Interlab. Labaqua. Fundación para la prevención de riesgos laborales. *Guía de buenas prácticas en el sector de la Acuicultura*. [recurso electrónico]. Gobierno de España. Ministerio de Trabajo y Economía Social. [Consulta: 24 de junio 2021]. Disponible en:http://www.asemaonline.com/pdf/prevencion_acuicultura.pdf. - <https://www.insst.es/-/clasificacion-y-fases-de-la-acuicultura>
- Banco de la República de Colombia. *Tasas de colocación consolidadas*. [en línea]. Promedio mensual histórico periodicidad mensual – TERADATA. [consulta: 07 de julio de 2021]. Disponible en: <https://totoro.banrep.gov.co/analytics/saw.dll?Go>
- Datos Abiertos. *Tarifas de Servicios de Energía – EPM*. [en línea]. Gobierno de Colombia. Datos Abiertos. Tarifa horaria sector Industrial y Comercial. Mes de junio 2021. [consulta: 08 de julio de

2021]. Disponible en: <https://www.datos.gov.co/Funci-n-p-blica/Tarifas-para-Servicios-de-Energ-a-EPM/sfcd-b3ey>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, Colombia. *PRINCIPALES INDICADORES LA GUAJIRA Población y demografía. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. [Recurso electrónico]. Población indígena del Departamento de La Guajira por pueblo indígena, CNPV 2018. [consulta: 10 de abril 2021]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrollo-territorial/050220-Info-Gobernacion-La-Guajira.pdf>

Gálvez Gómez, A. (2011) *Aplicación del proceso de osmosis inversa al tratamiento del agua de mar. Estudio técnico y de viabilidad económica*. Trabajo Final de Carrera Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona Tech. [consulta: 01 de abril de 2021]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13099?locale-attribute=es>

Global Water Intelligence. *GWI DesalData's*, [recurso electrónico]. Download Brochure. [Consulta: 01 de julio de 2021] Disponible en: <https://www.desaldata.com/>

Grubert, E.A.; Stillwell, M.E.; Webber, M.E. (2014) Where does solar-aided seawater desalination make sense? A method for identifying sustainable sites. *Desalination*, 339: 10-17.

Herramienta GeoLCOE *Costos Nivelados de Generación de Electricidad*. [en línea]. Unidad de Planeación Minero-Energética (UMPE), Gobierno de Colombia. Obtención de costos de la energía eólica y FV. [consulta: 07 de julio de 2021]. Disponible en: <http://www.geolcoe.siel.gov.co/#>.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. *Minvivienda desarrolló Segunda Jornada Virtual de Negocios y Contratación de Guajira Azul*. [en línea]. Guajira Azul. [consulta: 10 de abril de 2021]. Disponible en: <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-agua-y-saneamiento-basico/guajira-azul>

Pontificia Universidad Católica de Chile. *Curso Geografía del Mar. Propiedades del Agua de Mar*. [en línea]. Propiedades químicas del agua del océano. Proporción de Sales disueltas en los océanos. [consulta: 05 de junio de 2021]. Disponible en: http://www7.uc.cl/sw_educ/geo_mar/html/h32.html

Software

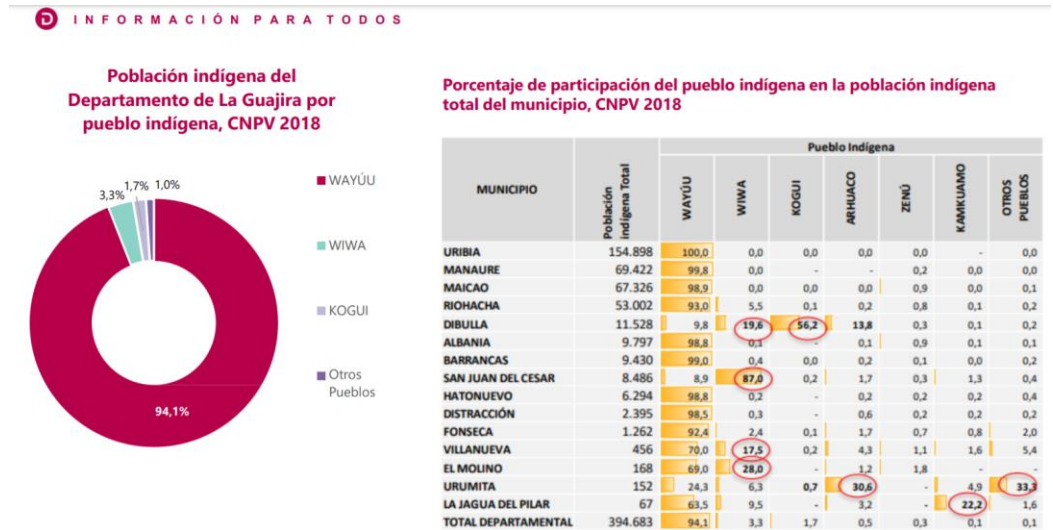
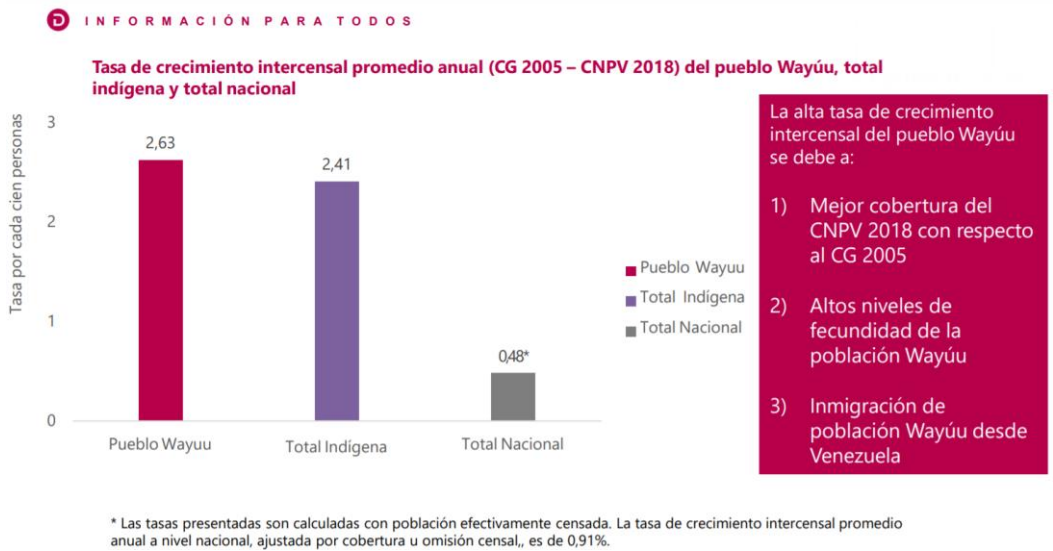
Valentin Software GmbH (2020). PVSOL. PV*SOL premium 2020 (R8). Berlin Alemania. Versión de Red. URL: <http://www.valentin-software.com>

Anexo 1. Densidad Poblacional Guajira Colombia.

INFORMACIÓN PARA TODOS

IDENTIFICACIÓN		POBLACIÓN CENSADA			POBLACIÓN AJUSTADA POR COBERTURA			OMISIÓN CENSAL		
NOMBRE DEPARTAMENTO	NOMBRE MUNICIPIO	TOTAL	CABECERA	CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO	TOTAL	CABECERA	CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO	TOTAL	CABECERA	CENTROS POBLADOS Y RURAL DISPERSO
Antioquia	Medellin	2.372.330	2.332.487	39.843	2.427.129	2.382.399	44.730	2,3%	2,1%	10,9%
Atlántico	Barranquilla	1.120.103	1.119.367	736	1.206.319	1.205.284	1.035	7,1%	7,1%	28,9%
Bogotá, D.C.	Bogotá, D.C.	7.181.469	7.166.249	15.220	7.412.566	7.387.400	25.166	3,1%	3,0%	39,5%
Bolívar	Cartagena	887.946	801.100	86.846	973.045	876.885	96.160	8,7%	8,6%	9,7%
Boyacá	Tunja	167.991	160.661	7.330	172.548	163.894	8.654	2,6%	2,0%	15,3%
Caldas	Manizales	400.436	375.432	25.004	434.403	405.234	29.169	7,8%	7,4%	14,3%
Caquetá	Florencia	156.789	139.843	16.946	168.346	147.939	20.407	6,9%	5,5%	17,0%
Cauca	Popayán	277.270	230.298	46.972	318.059	266.561	51.498	12,8%	13,6%	8,8%
Cesar	Valledupar	459.349	401.588	57.761	490.075	431.794	58.281	6,3%	7,0%	0,9%
Córdoba	Montería	433.723	355.317	78.406	490.935	388.499	102.436	11,7%	8,5%	23,5%
Chocó	Quibdó	120.679	108.450	12.229	129.237	113.124	16.113	6,6%	4,1%	24,1%
Huila	Neiva	314.526	294.905	19.621	357.392	335.994	21.398	12,0%	12,2%	6,3%
La Guajira	Riohacha	177.573	121.417	56.156	188.014	126.103	61.911	5,6%	3,7%	9,3%
Magdalena	Santa Marta	479.853	439.052	40.801	499.192	455.299	43.893	3,9%	3,6%	7,0%
Meta	Villavicencio	451.212	419.657	31.555	531.275	492.052	39.223	15,1%	14,7%	19,5%
Nariño	Pasto	352.326	274.200	78.126	392.930	308.095	84.835	10,3%	11,0%	7,9%
Norte de Santander	Cúcuta	629.414	607.236	22.178	711.715	685.445	26.270	11,6%	11,4%	15,6%
Quindío	Armenia	275.641	268.445	7.196	295.208	287.245	7.963	6,6%	6,5%	9,6%
Risaralda	Pereira	409.670	337.149	72.521	467.269	385.838	81.431	12,3%	12,6%	10,9%
Santander	Bucaramanga	528.855	519.111	9.744	581.130	570.752	10.378	9,0%	9,0%	6,1%
Sucre	Sincelejo	274.622	248.033	26.589	277.773	249.323	28.450	1,1%	0,5%	6,5%
Tolima	Ibagué	500.686	469.251	31.435	529.635	492.554	37.081	5,5%	4,7%	15,2%
Valle del Cauca	Calí	1.822.869	1.781.388	41.481	2.227.642	2.172.527	55.115	18,2%	18,0%	24,7%

Fuente: DANE-DCD, CNPV 2018



Anexo 3. Análisis Potencial Eólico del Punto de Referencia.

Intervalo de la Clase (m/s)	v(m/s)	p(v) ₇₀	1.5sle		E-82 E2		E-82 E4		G80-2.0 MW		S88 - 2.1 MW	
			P _i (kW)	p _i P _i Δv _i (kW)	P _i (kW)	p _i P _i Δv _i (kW)	P _i (kW)	p _i P _i Δv _i (kW)	P _i (kW)	p _i P _i Δv _i (kW)	P _i (kW)	p _i P _i Δv _i (kW)
2 ≤ v ≤ 3	-	-	-		-		-		-		-	
3 < v ≤ 4	3,5	0,0002	10	0,00	25	0,00	25	0,00	0	0,00	0	0,00
4 < v ≤ 5	4,5	0,0008	40	0,03	82	0,06	82	0,06	66,3	0,05	20	0,02
5 < v ≤ 6	5,5	0,0023	180	0,41	174	0,39	174	0,39	152	0,34	110	0,25
6 < v ≤ 7	6,5	0,0057	240	1,36	321	1,82	321	1,82	280	1,59	300	1,70
7 < v ≤ 8	7,5	0,0124	400	4,95	532	6,59	525	6,50	457	5,66	640	7,93
8 < v ≤ 9	8,5	0,0243	680	16,50	815	19,77	800	19,41	690	16,74	910	22,08
9 < v ≤ 10	9,5	0,0433	980	42,41	1180	51,07	1135	49,12	978	42,32	1210	52,36
10 < v ≤ 11	10,5	0,0706	1120	79,12	1580	111,62	1510	106,67	1296	91,55	1480	104,55
11 < v ≤ 12	11,5	0,1051	1380	145,00	1890	198,59	1880	197,54	1598	167,91	1210	127,14
12 < v ≤ 13	12,5	0,1405	1460	205,18	2100	295,12	2200	309,17	1818	255,49	1680	236,09
13 < v ≤ 14	13,5	0,1652	1480	244,49	2250	371,70	2500	413,00	1935	319,66	1870	308,92
14 < v ≤ 15	14,5	0,1650	1500	247,54	2350	387,81	2770	457,13	1980	326,75	2000	330,05
15 < v ≤ 16	15,5	0,1338	1500	200,65	2350	314,36	2910	389,27	1995	266,87	2080	278,24
16 < v ≤ 17	16,5	0,0828	1500	124,20	2350	194,58	3000	248,40	1999	165,52	2100	173,88
Subtotal	-	-	-	A = 1311,85	-	A = 1953,47	-	A = 2198,47	-	A = 1660,45	-	A = 1643,21
		F(V _D) - F(V _N)										
v > 17	1.5sle	7,8630E-03	1500	B = 11,79		B = 18,48		B = 2,65		B = 1,76		B = 16,51
	E-82 E2	7,8630E-03			2350							
	E-82 E4	F(V _D) - F(V _N)					3000					
	G80-2.0 MW	8,8193E-04							2000			
	S88 - 2.1 MW	7,8630E-03									2100	
Total (kW)	(P) = A + B =			1323,64		1971,95		2201,12		1662,21		1659,72
Potencia media de funcionamiento: ⟨P⟩ [kW]				1323,64		1971,95		2201,12		1662,21		1659,72
Energía producida anualmente: E = ⟨P⟩ * T, T: 8760h [kWh]				11595094,21		17274297,20		19281811,54		14560991,13		14539169,67
Rendimiento Estacionario (η _{EM}) = A + B =				0,20		0,27		0,30		0,24		0,20
Factor de Carga FC				0,88		0,84		0,73		0,83		0,79

$$E = \langle P \rangle * T, T: 8760h [kWh]$$

Anexo 4. Costos nivelados de Generación de Electricidad a partir de Energía Eólica en Colombia.

Precio de dólar julio 2021	0,84 €/USD
----------------------------	------------

LCOE Aerogenerador de 10MW en Uribia	523,72	USD/MWh
LCOE Aerogenerador de 10MW en euros	439,92	€/MWh
	0,44	€/kWh
LCOE proporcional a un Aerogenerador de 3MW. [3/10]	131,97	€/MWh
	0,13	€/kWh

Precio de Operación y Mantenimiento de un Aerogenerador de 10MW en Uribia	64,78	USD/MWh
O&M Aerogenerador de 10MW en euros	54,41	€/MWh
	0,054	€/kWh
O&M proporcional a un Aerogenerador de 3MW. [3/10]	16,32	€/MWh
	0,016	€/kWh

Anexo 5. Costos nivelados de Generación de Electricidad a partir de Energía FV en Colombia

Costos Nivelados de Generación de Electricidad en Colombia Volver al menú de tecnologías

Fotovoltaica
Selección módulo: Parámetros Financieros

285,58 USD/MWh
INVERSIÓN


0 USD/MWh
COMBUSTIBLES

0 USD/MWh
EXTERNALIDADES

69,83 USD/MWh
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO FIJO

0 USD/MWh
OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO VARIABLE

355,42 USD/MWh
LCOE



Fotovoltaica
Proyecto localizado en URIBIA (LA GUAJIRA) Region Caribe
Capacidad: 20 MW

[Panel general](#) [Descargar reporte](#)

WACC: 7.97%

Parámetros Financieros / Generales / Parámetros Financieros Generales

Parámetros Financieros Generales

Método de evaluación: Metodología Original

Estructura de capital de la deuda (%): 60

Estructura del capital propio (%): 40

Costo nominal de la deuda (%): 8,05

Precio de dólar julio 2021	0,84 €/USD
----------------------------	------------

LCOE de una Planta de 20MW en Uribia	355,42	USD/MWh
LCOE de una Planta 20MW en euros	298,55	€/MWh
	0,29	€/kWh
LCOE de una Planta de 9,8MW [9,8/20].	146,29	€/MWh
	0,14	€/kWh

Precio de Operación y Mantenimiento de una Planta de 20MW en Uribia	64,78	USD/MWh
O&M de una Planta de 20MW en Uribia en euros	54,41	€/MWh
	0,054	€/kWh
O&M proporcional a una Planta de 9,8MW. [9,8/20]	16,32	€/MWh
	0,016	€/kWh

Anexo 6. Tasa de Captación para Inversión en Colombia.

Tasas de captación diarias: CDT y CDAT
1.2.1.1.1. Para un día, periodicidad diaria
Información disponible a partir del 1 de abril de 2008.

Martes, 06 de julio de 2021

Cuenta	Emisiones puntuales y rangos de emisión	Bancos comerciales		Compañías de financiamiento comercial		Cooperativas financieras		Corporaciones financieras		Entidades financieras especiales		Total establecimientos					
		Tasa	Monto	Tasa	Monto	Tasa	Monto	Tasa	Monto	Tasa	Monto	Tasa	Monto				
CDT	A 30 días	1,4934%	96.551,2127	0,7796%	644,7337	1,0088%	2.838,6366	-	-	-	-	-	1,4751%	100.034,5829			
	Entre 31 y 44 días	1,5583%	12.703,1869	0,3388%	548,2544	1,0363%	78,5693	-	-	-	-	-	-	1,5050%	13.330,0106		
	A 45 días	1,6343%	573,6050	-	-	1,1100%	3,6864	-	-	-	-	-	-	-	1,6310%	577,2914	
	Entre 46 y 59 días	1,0270%	503,2354	0,3000%	4,5470	1,2608%	142,6808	-	-	-	-	-	-	-	1,0732%	650,4632	
	A 60 días	1,4806%	29.706,0059	0,3281%	139,7742	0,9627%	865,1788	-	-	-	-	-	-	-	1,4605%	30.730,9589	
	Entre 61 y 89 días	1,8530%	4.407,3650	0,3000%	48,2930	1,0886%	31,5020	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8309%	4.487,1600
	A 90 días	1,8470%	368.115,3193	2,6823%	18.484,1305	2,3744%	11.782,8699	-	-	2,2300%	21.000,0000	1,8870%	386.599,4498	-	1,8870%	386.599,4498	
	Entre 91 y 119 días	2,2207%	35.676,4668	2,3114%	211,0219	2,3842%	830,0582	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2249%	36.717,5469
	A 120 días	1,8419%	68.933,0053	3,1539%	2.247,5431	2,5949%	2.015,6618	-	-	-	-	-	-	-	-	1,8029%	73.196,2102
	Entre 121 y 179 días	2,4087%	75.126,6979	2,9305%	18.975,5443	2,6403%	1.862,1397	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5164%	95.964,3818
	A 180 días	2,1565%	179.240,3651	3,4999%	6.785,8185	2,7819%	7.433,3503	-	-	-	-	-	-	-	-	2,2054%	186.006,1835
	Entre 181 y 359 días	2,6347%	135.288,9002	3,2836%	14.415,9314	3,2502%	3.048,9457	1,8500%	1,0600	-	-	-	-	-	-	2,7083%	152.754,8373
	A 360 días	3,0257%	122.691,0025	3,9379%	8.888,7481	4,2233%	5.110,9110	-	-	-	-	2,8500%	20.000,0000	3,0873%	131.579,7506		
	Superiores a 360 días	4,5429%	84.813,3044	4,0620%	848,7136	4,5074%	723,5047	-	-	-	-	-	-	-	-	4,5381%	86.385,5227
Captaciones a través de CDT por red de oficinas	2,0327%	1.015.522,9145	3,4260%	41.236,5013	2,7066%	36.787,6952	1,8500%	1,0600	-	-	-	-	-	-	2,1079%	1.093.548,1709	
Captaciones a través de CDT por tesorería	3,6140%	198.806,7578	2,6314%	30.986,5523	-	-	-	-	-	-	2,5300%	41.000,0000	3,3375%	270.783,3102			

Anexo 7. Cálculo PBA en el Sistema de Energía Eólica.

$$CF_0 = (ING_0 - CT_0)$$

CF_0 : Costo Fijo en el año cero.

ING_0 : Ingreso en el año cero. Precio de la energía en Colombia (0,096€/kWh).

CT_0 : Costos totales en el año cero = Costos (O&M) Operativos y Mantenimiento (13,4 €/MWh) + Costos Financieros.

$$CF_0 = \left(E [kWh] * \frac{0,096€}{kWh} - (OM_0 + FT_0) \right)$$

OM_0 : costo Operativos y Mantenimiento en el año cero.

FT_0 : costos financieros en el año cero.

El costo O&M en el año cero se definen así:

$$OM_0 = (E [MWh] * Costo O\&M [€/MWh])$$

$$OM_0 = \left(3 \text{ MW} * \frac{6394 \text{ h}}{\text{año}} * \frac{13,4€}{\text{MWh}} \right) = 257.070,96€$$

El costo financiero en el año cero se define de la siguiente forma, con n=1.

$$FT_0 = r * I * \left(1 - \frac{1}{(1+k)^n} \right) * \frac{1}{k}$$

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048€ + 1.257.360€ + 3.000.000) * \left(1 - \frac{1}{(1+0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 800.566,12€$$

$$CF_0 = (19.184.400 \text{ kWh} * 0,096€/kWh - (257.070,96€ + 800.566,12€)) = 784.065,31€$$

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z : tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k : tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$CF_0 = 19.184.400 \text{ kWh} * \frac{0,096€}{kWh} - (257.070,96€ + 800.566,12€) = 784.065,31€$$

Año	$784.065,3€ * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$784.065,3€ * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	790.280,14	13	868.814,33
2	796.544,22	14	875.700,91

3	802.857,96	15	882.642,07
4	809.221,74	16	889.638,26
5	815.635,97	17	896.689,90
6	822.101,03	18	903.797,43
7	828.617,35	19	910.961,30
8	835.185,31	20	918.181,95
9	841.805,33	21	925.459,84
10	848.477,83	22	932.795,42
11	855.203,21	23	940.189,14
12	861.981,90	24	947.641,46

<i>INV=20.002.408,8</i>	<i>20.800.424,11</i>
-------------------------	----------------------

Anexo 8. Cálculo del Valor Actual Nominal (VAN) para el sistema de Energía Eólica.

$$VAN = -INV + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+k)^j} = -INV + CF_0 \sum_{j=1}^N \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z : tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k : tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$CF_0 = \left(19.184.400 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (257.070,96\text{€} + 800.566,12\text{€}) \right) = 784.065,31\text{€}$$

Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	1,01	16	1,13
2	1,02	17	1,14
3	1,02	18	1,15
4	1,03	19	1,16
5	1,04	20	1,17
6	1,05	21	1,18
7	1,06	22	1,19
8	1,07	23	1,20
9	1,07	24	1,21
10	1,08	25	1,22
11	1,09	26	1,23
12	1,10	27	1,24
13	1,11	28	1,25
14	1,12	29	1,26
15	1,13	30	1,27

$\sum_{j=1}^{30} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	33,98
$CF_0 \sum_{j=1}^{30} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	26.646.112,69

$$VAN = -20.002.408,8 + 26.646.112,69 = 6.643.703,88$$

Anexo 9. Cálculo PBA para el sistema Fotovoltaico.

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z : tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k : tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$CF_0 = \left(19.817.399 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (569.552,04 \text{ €} + 983.360,38 \text{ €}) \right) = -194.005,07 \text{ €}$$

Año	$-194.005,07\text{€} * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$-194.005,07\text{€} * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	-195.542,84	19	-225.403,56
2	-197.092,79	20	-227.190,20
3	-198.655,03	21	-228.991,00
4	-200.229,65	22	-230.806,08
5	-201.816,75	23	-232.635,54
6	-203.416,43	24	-234.479,51
7	-205.028,80	25	-236.338,09
8	-206.653,94	26	-238.211,40
9	-208.291,96	27	-240.099,57
10	-209.942,97	28	-242.002,69
11	-211.607,07	29	-243.920,91
12	-213.284,35	30	-245.854,32
13	-214.974,93	31	-247.803,07
14	-216.678,91	32	-249.767,26
15	-218.396,40	33	-251.747,01
16	-220.127,50	34	-253.742,46
17	-221.872,32	35	-255.753,73
18	-223.630,97		

$INV=24.569.583,8$	$Cash Flow = -7.851.990,01$
--------------------	-----------------------------

Anexo 10. Cálculo del VAN en el Sistema Fotovoltaico

$$VAN = -INV + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+k)^j} = -INV + CF_0 \sum_{j=1}^N \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z : tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k : tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$CF_0 = \left(19.817.399 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (569.552,04 \text{ €} + 983.360,38 \text{ €}) \right) = -194.005,07 \text{ €}$$

Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	1,01	19	1,16
2	1,02	20	1,17
3	1,02	21	1,18
4	1,03	22	1,19
5	1,04	23	1,20
6	1,05	24	1,21
7	1,06	25	1,22
8	1,07	26	1,23
9	1,07	27	1,24
10	1,08	28	1,25
11	1,09	29	1,26
12	1,10	30	1,27
13	1,11	31	1,28
14	1,12	32	1,29
15	1,13	33	1,30
16	1,13	34	1,31
17	1,14	35	1,32
18	1,15		

$\sum_{j=1}^{35} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	40,47
$CF_0 \sum_{j=1}^{35} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	-7.851.990,01

$$VAN = -24.569.583,8 - 7.851.990,01 = -32.421.573,8$$

Anexo 11. Cálculo del PBA para la Energía FV y Eólica

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z: tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k: tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$OM_0 = \left(22.015,4 \text{ MW} * \frac{42,14\text{€}}{\text{MWh}} \right) = \mathbf{927.728,9\text{€}}$$

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048,8\text{€} + 1.257.360\text{€} + 3.000.000 + 1.081.080) * \left(1 - \frac{1}{(1+0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 843.834,71 \text{ €}$$

$$CF_0 = \left(22.015.457 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (927.728,9 \text{ €} + 843.834,71 \text{ €}) \right) = 341.917,8 \text{ €}$$

$$INV = \sum_{j=1}^{PBA} \frac{CF_j}{(1+k)^j} = CF_0 \sum_{j=1}^{PBA} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

Año	$341.917,8\text{€} * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$341.917,8\text{€} * \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	344.627,98	19	397.255,02
2	347.359,65	20	400.403,83
3	350.112,96	21	403.577,60
4	352.888,10	22	406.776,52
5	355.685,24	23	410.000,80
6	358.504,55	24	413.250,63
7	361.346,20	25	416.526,23
8	364.210,38	26	419.827,79
9	367.097,26	27	423.155,51
10	370.007,02	28	426.509,62
11	372.939,85	29	429.890,31
12	375.895,93	30	433.297,80
13	378.875,43	31	436.732,29
14	381.878,56	32	440.194,01
15	384.905,48	33	443.683,17
16	387.956,40	34	447.199,99
17	391.031,50	35	450.744,68
18	394.130,98		

$INV=21.083.488,8$	$13.838.479,27$
--------------------	-----------------

Anexo 12. Cálculo del VAN para energía FV y Eólica.

$$VAN = -INV + \sum_{j=1}^N \frac{CF_j}{(1+k)^j} = -INV + CF_0 \sum_{j=1}^N \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$$

z : tasa unitaria de variación anual. Se asume en un **3%** considerando los costes de explotación.

k : tasa unitaria de descuento neta de inflación. Se considera según el IPC de 2020 en Colombia en **2,19%**.

$$OM_0 = \left(22.015,4 \text{ MW} * \frac{42,14\text{€}}{\text{MWh}} \right) = \mathbf{927.728,9\text{€}}$$

$$FT_0 = 0,0409 * (15.745.048,8\text{€} + 1.257.360\text{€} + 3.000.000 + 1.081.080) * \left(1 - \frac{1}{(1+0,0219)} \right) * \frac{1}{0,0219}$$

$$FT_0 = 843.834,71 \text{ €}$$

$$CF_0 = \left(22.015.457 \text{ kWh} * \frac{0,096\text{€}}{\text{kWh}} - (927.728,9 \text{ €} + 843.834,71 \text{ €}) \right) = 341.917,8 \text{ €}$$

En línea con los cálculos anteriores

Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	Año	$\frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$
1	1,01	19	1,16
2	1,02	20	1,17
3	1,02	21	1,18
4	1,03	22	1,19
5	1,04	23	1,20
6	1,05	24	1,21
7	1,06	25	1,22
8	1,07	26	1,23
9	1,07	27	1,24
10	1,08	28	1,25
11	1,09	29	1,26
12	1,10	30	1,27
13	1,11	31	1,28
14	1,12	32	1,29
15	1,13	33	1,30
16	1,13	34	1,31
16	1,14	35	1,32
18	1,15		

$\sum_{j=1}^{35} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	40,47
$CF_0 \sum_{j=1}^{35} \frac{(1+z)^j}{(1+k)^j}$	13.838.479,27

$$VAN = -21.083.488,8 + 13.838.479,27 = -2.055.688,73$$

Anexo 13. Cálculo para la Recuperación de la Inversión con la venta del agua.

	Precio del Agua	Producción de Agua	Ingresos por día	Ingresos por año
Ingreso por venta de agua en Colombia	0,48€/m ³	19344m ³	9470,58€	3.456.765,08€

	Desalinización con Energía Eólica	Desalinización con Energía FV	Desalinización con Energía Eólica y FV
<i>INV</i>	20.002.408,8€	24.569.583,8€	21.083.488,8€
<i>ING</i> ₀ (Energía + Venta de Agua)	5.298.467,4€	4.815.672,4€	5.570.248,9€
<i>OM</i> ₀	257.070,9€	569.552€	927.731,3€
<i>FT</i> ₀	800.566,1€	983.360,3€	843.834,7€
<i>CF</i> ₀	4.240.830,4€	3.262.760€	3.798.682,8€

Año	Flujo de Caja con Energía Eólica	Flujo de Caja con Energía FV	Flujo de Caja con Energía Eólica y FV
1	4.274.444,97	3.288.621,99	3.828.792,81
2	4.308.325,98	3.314.688,96	3.859.141,40
3	4.342.475,55	3.340.962,55	3.889.730,54
4	4.376.895,80	3.367.444,40	3.920.562,15
5	4.411.588,87	3.394.136,15	3.951.638,14
6	4.446.556,94	3.421.039,47	3.982.960,45
7	4.481.802,18	3.448.156,03	4.014.531,03
8	4.517.326,79	3.475.487,54	4.046.351,86
9	4.553.132,98	3.503.035,68	4.078.424,91
10	4.589.222,99	3.530.802,19	4.110.752,18
11	4.625.599,06	3.558.788,78	4.143.335,70
12	4.662.263,46	3.586.997,20	4.176.177,48
13	4.699.218,48	3.615.429,22	4.209.279,58
14	4.736.466,42	3.644.086,60	4.242.644,06
15	4.774.009,60	3.672.971,13	4.276.273,01
16	4.811.850,37	3.702.084,61	4.310.168,51
17	4.849.991,07	3.731.428,86	4.344.332,68
18	4.888.434,10	3.761.005,70	4.378.767,65
19	4.927.181,84	3.790.816,98	4.413.475,56
20	4.966.236,71	3.820.864,55	4.448.458,58
21	5.005.601,15	3.851.150,30	4.483.718,90
22	5.045.277,60	3.881.676,10	4.519.258,70
23	5.085.268,55	3.912.443,86	4.555.080,20
24	5.125.576,48	3.943.455,50	4.591.185,64
25	5.166.203,91	3.974.712,95	4.627.577,27
26	5.207.153,37	4.006.218,16	
27	5.248.427,41	4.037.973,10	
28	5.290.028,60	4.069.979,73	
29	5.331.959,55	4.102.240,07	
30	5.374.222,85	4.134.756,11	
31		4.167.529,89	
32		4.200.563,45	
33		4.233.858,84	
34		4.267.418,15	
35		4.301.243,46	

RESUMEN

La desalinización de agua de mar se ha convertido en la forma más recurrente para obtener este recurso tan preciado. Los cambios del clima que han sucedido por estas épocas, así como la sobrepoblación mundial, han hecho que se busque las maneras de obtener el agua de consumo. Muchas tecnologías se han usado para retirar las sales disueltas en el agua de mar, pero la tecnología que toma gran relevancia por estos días ha sido la desalinización de agua de mar por Ósmosis Inversa o también llamada SWRO por sus siglas en inglés.

La OI es la técnica con la que se obtiene agua pura al hacer pasar agua de mar a través de una membrana semipermeable a alta presión, esta técnica se ha visto impulsada con más fuerza por la inclusión de las energías renovables haciendo que se cambie la fuente de generación eléctrica tradicional por combustible a este tipo de energías renovables y sostenibles.

El proyecto planta de desalinización Carrizal en la Guajira Colombiana, es un plan con sentido social que busca llevar agua potable a la población indígena Wayúu del lugar haciendo uso de la energía eléctrica a partir de un sistema asistido por red, este estará conformado por una fuente de energía eólica como fuente principal y de una fuente de energía fotovoltaica como respaldo.

La viabilidad técnica y económica del proyecto serán el estudio del presente documento en el que se identificarán los caudales necesarios de trabajo, la energía requerida de producción, el diseño de los sistemas de generación y la integración de estos en una operación conjunta con la red eléctrica, así mismo se encontrarán los costos de implementación de cada tecnología y el posible impacto ambiental que se pudiera presentar.

ABSTRACT

Desalination of seawater has become the most recurrent way to obtain fresh water. The climate changes that have recently occurred, plus the global overpopulation, have increased the need to find out new ways to obtain drinking water. Many technologies have been used to find a solution to remove dissolved salts in seawater, however, the most relevant technology nowadays is the desalination of seawater by Reverse Osmosis (SWRO).

RO is a technique to obtain fresh water by passing seawater through a membrane at high pressure, this technique has been strongly promoted, considering the inclusion of renewable energies which change the source of traditional electricity generation by fuel to this type of renewable and sustainable energy.

The Carrizal desalination project (La Guajira Colombia), is a plan with a social focus that seeks to bring drinking water to the indigenous Wayúu population, using electrical energy from a network-assisted system, implementing a main wind power source and a photovoltaic power source as backup.

The technical and economic feasibility of the project will be the purpose of this document, identifying the necessary feed water, the energy required for production, the design of the generation systems and the integration with the electricity grid, as well as recognizing the implementation costs of each technology and the possible environmental impact.