

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS  
DESALINIZADORAS USANDO ENERGÍAS RENOVABLES EN LA REGIÓN DE  
LA GUAJIRA COLOMBIANA

HANNA JIEMENEZ BARAHONA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2019

EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE PLANTAS  
DESALINIZADORAS USANDO ENERGÍAS RENOVABLES EN LA REGIÓN DE  
LA GUAJIRA COLOMBIANA

HANNA JIEMENEZ BARAHONA

Monografía para optar el título de Especialista en  
Gestión Ambiental

Orientadora:  
MONIKA ECHAVARRIA  
Bióloga

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2019

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director de la Especialización

---

Firma del calificador

Bogotá D.C., febrero 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrectora Académica y de Posgrado

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suarez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Emerson Mahecha Roa

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios por darme salud, por permitirme vivir esta experiencia y guiar mi camino siempre.

A mi orientadora Monika Echavarría por su apoyo y guía durante cada parte de la investigación y realización de este trabajo, gracias por su tiempo y recomendaciones.

A mi mamá y papá por sus consejos y cariño, sin su respaldo incondicional durante todo este proceso nada sería posible.

## CONTENIDO

	pág
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES</b>	<b>16</b>
1.1 ENERGÍA SOLAR	18
1.1.1 Energía solar directa.	19
1.1.2 Energía solar indirecta.	20
1.1.2.1 Destilador solar acoplado con colectores solares	21
1.1.2.2 Humidificación y deshumidificación solar	22
1.1.2.3 Destilación de membrana	23
1.1.2.4 Concentración solar térmica	24
1.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	25
1.3 ENERGÍA GEOTÉRMICA	27
1.4 ENERGÍA EÓLICA	28
1.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN Y COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	31
1.6 IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA	33
<b>2. PROCESOS DESALINIZADORES</b>	<b>38</b>
2.1 PROCESOS TÉRMICOS	43
2.1.1 Destilación flash de varias etapas (MSF).	43
2.1.2 Destilación de múltiples efectos (MED)	44
2.1.3 Evaporación por compresión de vapor (VC)	45
2.2 PROCESOS DE MEMBRANA	46
2.2.1 Ósmosis inversa (RO)	47
2.2.2 Electrodialisis (ED)	51
2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PROCESO DESALINIZADOR	52
<b>3. EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA PLANTA DESALINIZADORA EN LA GUAJIRA</b>	<b>56</b>
3.1 CONDICIONES GEOGRÁFICAS	56
3.2 CONDICIONES SOCIO - ECONÓMICAS	57
3.3 TIEMPO Y CLIMA DE LA GUAJIRA	58
3.4 RECURSO HÍDRICO	62
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>65</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>66</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>67</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<b>pág</b>
<b>Figura 1.</b> Energías renovables integradas con la tecnología de desalinización	18
<b>Figura 2.</b> Unidad de destilador solar	20
<b>Figura 3.</b> Esquema de destilador solar solo con un colector solar	21
<b>Figura 4.</b> Diagrama de destilador solar multiefecto acoplado con un colector solar	22
<b>Figura 5.</b> Diagrama de sistema de destilación	23
<b>Figura 6.</b> Proceso de destilación de membrana	24
<b>Figura 7.</b> Sistemas de concentración solar. (a) cilindro parabólico, (b) lentes de fresnel, (c) antena/motor, (d) torre de energía	25
<b>Figura 8.</b> Esquema de un típico sistema fotovoltaico	26
<b>Figura 9.</b> Diagrama de unidad de desalinización por osmosis inversa con un generador fotovoltaico	26
<b>Figura 10.</b> Esquema de sistema viento-electrodialisis (ed) para la desalinización del agua	29
<b>Figura 11.</b> Configuración vertical y horizontal de aerogeneradores	30
<b>Figura 12.</b> Diagrama de un sistema de ósmosis inversa impulsado por energía solar/eólica	31
<b>Figura 13.</b> Destilación instantánea de múltiples etapas (msf)	43
<b>Figura 14.</b> Planta de destilación de múltiples efectos (med)	44
<b>Figura 15.</b> Esquema de una planta de compresión de vapor mecánica (mvc)	45
<b>Figura 16.</b> Esquema de una planta de compresión de vapor térmica (tvc)	46
<b>Figura 17.</b> Rango efectivo de los procesos de membrana y su aplicación	47
<b>Figura 18.</b> Proceso de ósmosis y de ósmosis inversa	48
<b>Figura 19.</b> Esquema de subsistemas proceso de ósmosis inversa	48
<b>Figura 20.</b> Esquema general de una planta de ósmosis inversa	50
<b>Figura 21.</b> Movimiento de los iones en un proceso de electrodiálisis	51



## LISTA DE GRÁFICAS

	pág
<b>Gráfica 1.</b> Pronóstico de generación mundial de energía renovable	17
<b>Gráfica 2.</b> Capacidad de desalinización mundial de acuerdo a la tecnología (térmica/de membrana)	39
<b>Gráfica 3.</b> Capacidad de desalinización de acuerdo a la región	40
<b>Gráfica 4.</b> Precipitación media total anual/ mensual de Colombia	60

## LISTA DE MAPAS

	pág
<b>Mapa 1.</b> Zonas no interconectadas (zni) de colombia	35
<b>Mapa 2.</b> División administrativa de la guajira	56
<b>Mapa 3.</b> Precipitación media total anual de colombia	59
<b>Mapa 4.</b> Velocidad del viento a 10 metros de altura anual 2015 (m/s)	61
<b>Mapa 5.</b> Irradiación global horizontal media diaria/anual de colombia	62
<b>Mapa 6.</b> Índice de aridez de colombia	63

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág</b>
<b>Tabla 1.</b> Costos para sistemas de desalinización convencionales (ro y msf) y para sistemas impulsados por energía renovable	33
<b>Tabla 2.</b> Datos importantes de los procesos de desalinización	42
<b>Tabla 3.</b> Costo de desalinización en plantas con sistema de ósmosis inversa	50
<b>Tabla 4.</b> Distribución de costos	53
<b>Tabla 5.</b> Costo del agua potable para diferentes capacidades y tipo de proceso desalinizador	54
<b>Tabla 6.</b> Plantas desalinizadoras impulsadas por energía eólica y sistema de osmosis inversa	55
<b>Tabla 7.</b> Costo de agua para los diferentes sistemas de desalinización	55

## RESUMEN

Este trabajo está enfocado en la evaluación de la viabilidad para implementar una planta desalinizadora en la región de la Guajira Colombiana, impulsada por energía renovable; se inicia con una búsqueda de información sobre cada una de las energía renovables y aquellas que se ya han implementado en Colombia, posteriormente se evalúan cada uno de los procesos desalinizadores y las posibles combinaciones de estos con las energías renovables, finalmente se busca información sobre las condiciones geográficas, sociales y económicas de la región, además del acceso al agua potable que tienen los habitantes, con el fin de escoger el sistema y energía que mejor se acopla a las condiciones de la región de la Guajira. De acuerdo a la investigación, respecto al tipo de energía renovable, la eólica y la solar fotovoltaica, son muy prometedoras gracias a las condiciones de tiempo y clima de la Guajira, pero dada revisión bibliográfica se recomienda la energía solar fotovoltaica junto con el sistema de ósmosis inversa de bajo consumo energético.

**Palabras clave:** Desalinización, energías renovables, agua potable, Guajira

## ABSTRACT

This script is focused on the evaluation of the viability of implement a desalination plant in the region of Colombian Guajira driven by renewable energy; starting with a search for information about each one of the renewable energy and those that have been implemented in Colombia, afterwards each of the desalination processes and the possible combinations of these with renewable energies are evaluated. Finally the information about the geographic, social and economic conditions of the region is search, besides the access to drinking water that the inhabitants have, in order to choose the desalination system and energy that better fits to the conditions of the Guajira region. According to the research the wind power and photovoltaic solar energy, both are very promising thanks to the weather and climate conditions in Guajira, but with the bibliographic revision is recomend the use of photovoltaic solar energy with the reverse osmosis system that has low energy consumption.

**Keywords:** Desalination, renewable energies, drinking water, Guajira

## INTRODUCCIÓN

Colombia es un país privilegiado, en especial por los recursos hídricos con los que cuenta, pues según el IDEAM<sup>1</sup> se clasifica como uno de los países de gran oferta hídrica, con un rendimiento promedio (63 l/s-Km<sup>2</sup>) seis veces mayor que el mundial (10 l/s-Km<sup>2</sup>), pero según IANAS<sup>2</sup> lamentablemente la distribución del recurso hídrico no es homogénea en el país, dadas las condiciones geográficas y topográficas de cada región así como su clima y tiempo, por lo que hay millones de personas que no cuentan con acceso a agua potable. Según INVEMAR<sup>3</sup> se puede decir que el territorio marino colombiano es entre un 40 y 43 por ciento de los territorios emergidos, es por eso que este trabajo está dirigido al aprovechamiento del Mar Caribe al cual tiene acceso la región de la Guajira Colombiana con el fin de abastecer agua potable por medio de la desalinización ya que según el IDEAM<sup>4</sup> es una zona que presenta déficit de agua, clima árido y los valores de precipitación más bajos de Colombia, esta última responsable de provisionar agua dulce al planeta.

La desalinización se ha convertido a lo largo de los últimos años en una alternativa a la problemática de escasez de agua potable en zonas costeras y a nivel mundial su implementación se ha venido incrementando debido a los cambios ambientales que ha experimentado la tierra afectando la disponibilidad de agua dulce, algunos de los países de mayor aplicación según Ali-Karaghoulí son Arabia Saudita, Kuwait y Catar<sup>5</sup>, donde se ha convertido en un proceso significativo para abastecimiento doméstico e industrial.

---

<sup>1</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. [sitio web]. 2010. p. 69. Archivo en pdf. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>

<sup>2</sup> INTERAMERICAN NETWORK OF ACADEMIES OF SCIENCES - IANAS; Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Diagnóstico del agua en las Américas: Una visión al estado del recurso hídrico en Colombia. [sitio web]. México. 2012. p. 197. Archivo en pdf. Disponible en [https://www.ianas.org/water/book/diagnostico\\_del\\_agua\\_en\\_las\\_americas.pdf](https://www.ianas.org/water/book/diagnostico_del_agua_en_las_americas.pdf).

<sup>3</sup> INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS - INVEMAR. Colombia 50% Mar. [sitio web], Santa Marta.co. 2009. Disponible en <http://www.invemar.org.co/web/guest/50-mar>.

<sup>4</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. Op. cit., p. 55.

<sup>5</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 150. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

Para Ali-Karaghoulí<sup>6</sup> normalmente las plantas desalinizadoras para su operación utilizan combustibles fósiles, los cuales contribuyen a la contaminación del medio ambiente y al agotamiento de los recursos no renovables, además, el precio de estos combustibles dependerá de las variaciones que enfrente la industria petrolera, por consiguiente el uso de energías renovables como solar, eólica, fotovoltaica y geotérmica se convierten en una oportunidad para impulsar plantas desalinizadoras de ósmosis inversa, destilación instantánea de múltiples etapas (MSF), destilación de múltiples efectos (MED), evaporación por comprensión de vapores (VC) y electrodiálisis (ED) que son algunos de los procesos y métodos utilizados para la desalinización, haciendo de esta una alternativa amigable con el medio ambiente, sostenible y económica.

---

<sup>6</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 151

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la viabilidad de la implementación de plantas desalinizadoras usando energías renovables en la región de la Guajira Colombiana.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar las energías renovables viables en la Guajira Colombiana.
- Evaluar el proceso desalinizador más viable en Colombia.
- Establecer la viabilidad a nivel ambiental, social y económico de la implementación de una desalinizadora usando energías renovables en la Guajira.

## 1. DESCRIPCIÓN DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES

De acuerdo a Shatat y Riffat<sup>7</sup> el uso de combustibles fósiles en las plantas desalinizadoras eleva el costo de implementación además de aportar a la contaminación del medio ambiente; su factibilidad es baja en áreas remotas, dado que se puede experimentar escasez de combustibles y falta de servicio eléctrico.

Además Shatat y Riffat<sup>8</sup> mencionan que recientemente se ha incrementado la implementación de energías renovables para la desalinización como una fuente limpia y más amigable con el medio ambiente, que la normalmente usada por medio de combustibles; como lo menciona Noorollahi, Taghipoor Y Sajadi<sup>9</sup>, estos combustibles fósiles desperdician calor, liberan gases de efecto invernadero y salmuera en el medio ambiente. Los gases de efecto invernadero aumentan el calentamiento global, es decir, el aumento de la temperatura y del nivel del mar, amenazando el medio ambiente, sus ecosistemas, animales, plantas y paisajes.

Para el año 2008 según Shatat y Riffat<sup>10</sup> se evidencio que el 10% de la electricidad que se genera en todo el mundo fue a partir de energías renovables como la hidráulica, eólica, solar, siendo esta última la más usada; se pronostica que para el año 2035 este consumo aumentara a un 14% del consumo total de energía como se ilustra en la gráfica 1.

---

<sup>7</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [EBSCOhost]. 1 Marzo, 2014. Vol. 9. 2014. p. 10. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

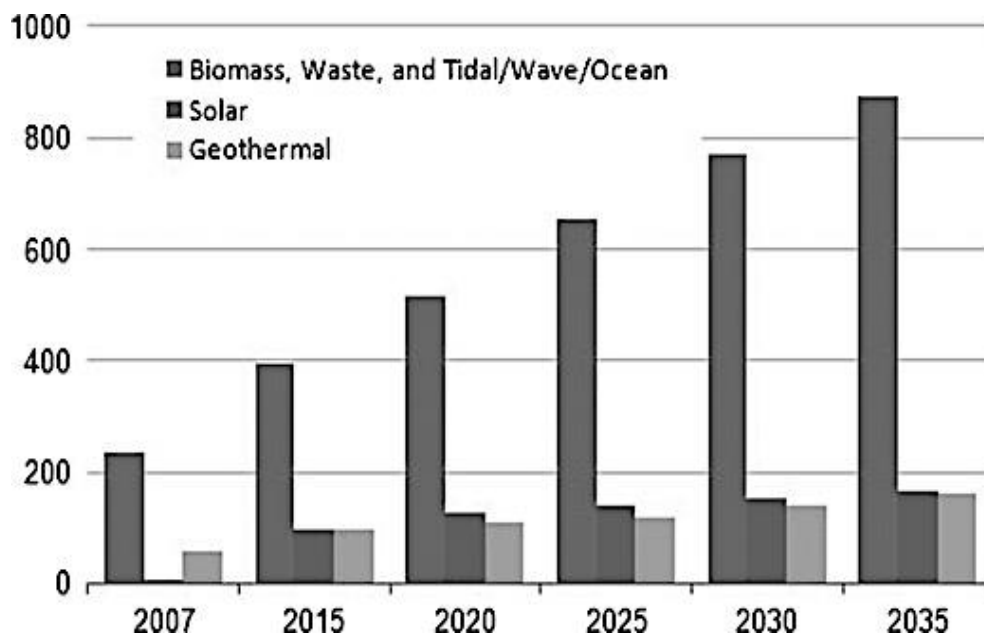
<sup>8</sup> *Ibíd.*, p. 10.

<sup>9</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. En: Geothermics. [ScienceDirect]. Mayo 2017. Vol 67. 2017. p. 69. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.008>.

<sup>10</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 10.



**Gráfica 1.** Pronóstico de generación mundial de energía renovable



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 11. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

Shatat y Riffat<sup>11</sup> aseguran que la unión del proceso de la desalinización y fuentes de energía como la solar, eólica o geotérmica permitirá lograr el abastecimiento de agua a diferentes regiones apartando positivamente al problema de contaminación ya que se reducen las emisiones de gases; además el precio de los combustibles fósiles está aumentando y los suministros se están agotando, mientras que el costo de implementación de las energías renovables está disminuyendo; como lo indica Noorollahi, Taghipoor y Sajadi<sup>12</sup> en la figura 1 se puede observar la relación de las energías renovables y las tecnologías para la desalinización del agua de mar.

<sup>11</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p.10

<sup>12</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Op. cit., p. 69

**Figura 1.** Energías renovables integradas con la tecnología de desalinización



Fuente: NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. En: Geothermics. [ScienceDirect]. Mayo 2017. Vol 67. 2017. p. 70. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.008>.

Para Ali, et al.<sup>13</sup> las principales fuentes de energía renovables, las cuales son de interés en la implementación de la desalinización son:

### 1.1 ENERGÍA SOLAR

De acuerdo con Shatat y Riffat<sup>14</sup> es una de las energías más antigua y abundante en el planeta, puede usarse para el calentamiento de edificios, de agua para uso doméstico e industrial, de piscinas, también para operar bombas, desalinización del agua, generación de electricidad entre otras funciones. Según Ali, et al.<sup>15</sup> varios estudios alentadores con el 1% de la energía solar en áreas áridas sería suficiente para abastecer la demanda de energía en el mundo.

<sup>13</sup> ALI, A, et al. Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Enero, 2018. vol. 81. 2018. p. 2. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>.

<sup>14</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p.11.

<sup>15</sup> ALI, A, et al. Op. cit., p.3.

Como menciona Shatat y Riffat<sup>16</sup> esta energía posibilita la conversión del agua salina en agua potable por medio de tecnología simple, económica y de bajo costo, siendo adecuada para áreas y comunidades pequeñas con niveles bajos ingresos; la desalinización se puede realizar de dos maneras, una es calentando directamente el agua o convirtiéndose en electricidad, gracias a su flexibilidad ha sido uno de los centros principales de la desalinización.

La desalinización por medio de la energía solar regularmente se divide en dos categorías, sistemas directos e indirectos.

**1.1.1 Energía solar directa.** Como lo indica Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>17</sup> en los directos, el proceso de obtención de calor y desalinización se dan en un mismo dispositivo, como el destilador solar, de diseño básico parecido a un invernadero, en este dispositivo la energía solar entra por medio de un panel de vidrio o plástico transparente en forma de pendiente que calienta el agua de mar, esta se evapora y posteriormente se condensa en los paneles de vidrio más fríos, como se puede ver en la figura 2.

Se ha demostrado que 1m<sup>2</sup> de área podrá producir entre 3 y 4 L / día, lo que evidencia una viabilidad para producción a pequeña escala, pues dado estos bajos valores se necesitaría un terreno muy grande para una mayor producción. Su baja eficiencia y productividad se deben a la incapacidad que presentan los colectores para poder transformar toda la energía que recogen; además Shatat y Riffat<sup>18</sup> agregan que son vulnerables a daños por el clima y los costos de construcción y mantenimiento son más elevados que los otros sistemas.

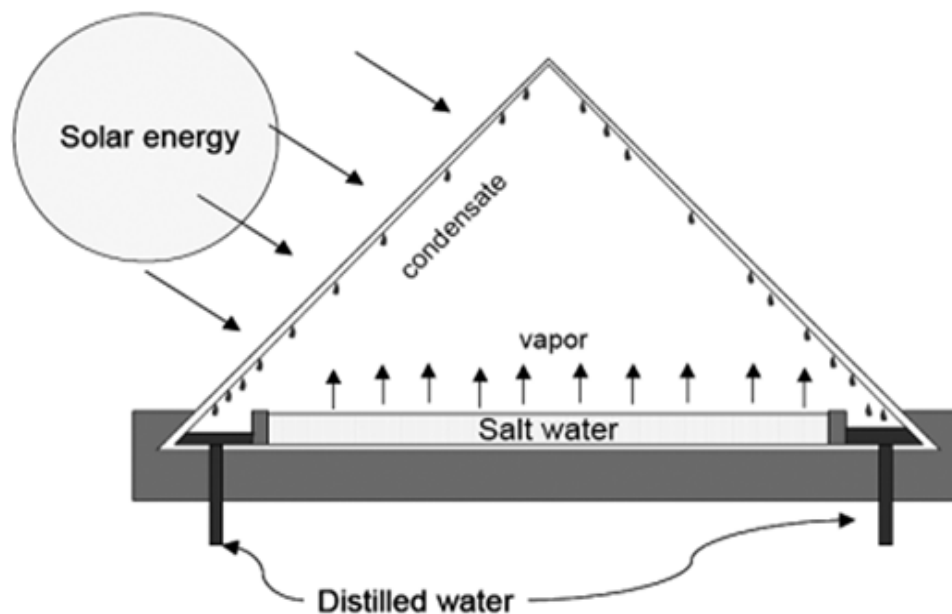
---

<sup>16</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p.11.

<sup>17</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p.159.

<sup>18</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 12.

**Figura 2.** Unidad de destilador solar



Fuente; SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 12. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**1.1.2 Energía solar indirecta.** De acuerdo con Al- Karaghoul y Kazmerski<sup>19</sup>, en los indirectos, se tiene dividida la planta en dos, uno es el recolector de la energía solar por medio de un sistema de captación, que podría ser humidificación-deshumidificación, destilación de membrana, destilador solar acoplado con colectores solares o un concentrador solar, y el otro es la unidad de desalinización; incluso Shatat y Riffat<sup>20</sup> mencionan que ambas partes se pueden unir en diferentes combinaciones, algunas más favorables para plantas de gran tamaño otras para pequeña escala.

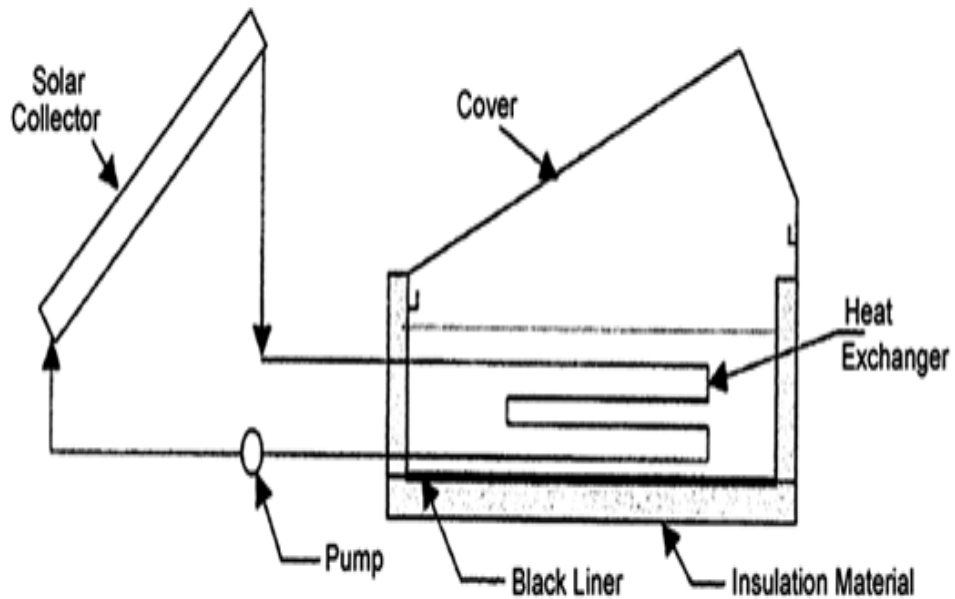
A continuación se describen algunos de los sistemas de captación usados para la recolección de la energía solar:

<sup>19</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 160.

<sup>20</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 12.

**1.1.2.1 Destilador solar acoplado con colectores solares.** Como lo indican Shatat y Riffat<sup>21</sup>, para aumentar la producción algunos investigadores han adaptado un destilador simple o multiefecto con un colector solar, como se puede ver en las figuras 3 y 4, lo que permite aumentar la eficiencia utilizando el calor latente de condensación en cada una de las etapas.

**Figura 3.** Esquema de destilador solar solo con un colector solar

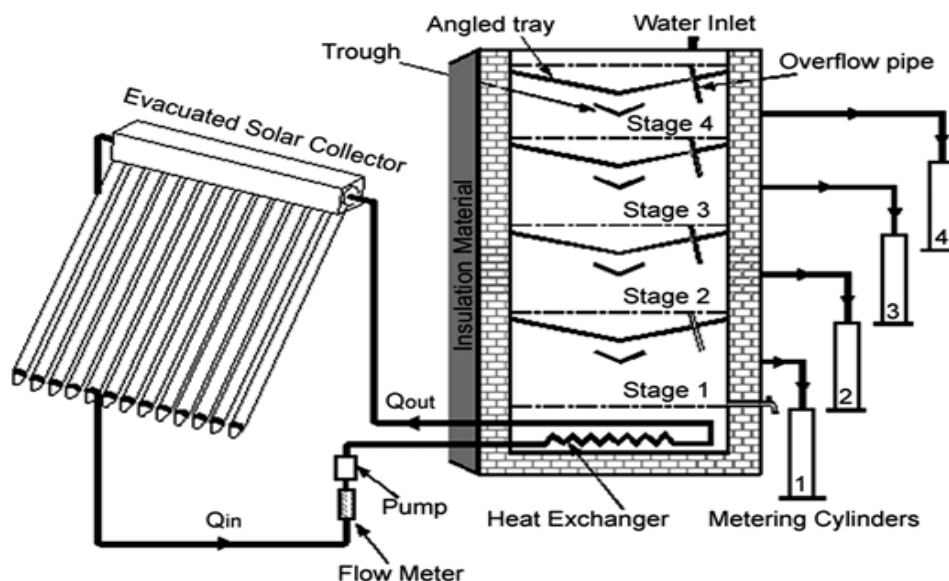


Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 13. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

---

<sup>21</sup> *Ibíd.*, p. 13.

**Figura 4.** Diagrama de destilador solar multiefecto acoplado con un colector solar

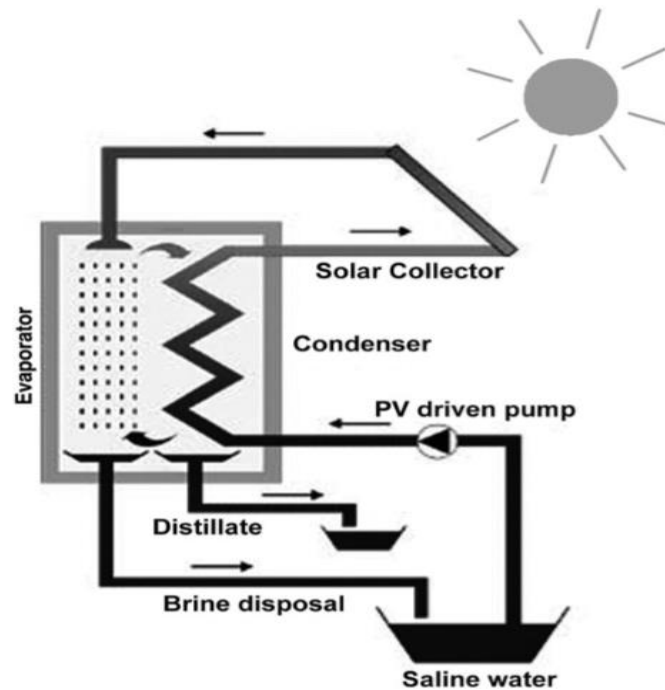


Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Safa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 13. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**1.1.2.2 Humidificación y deshumidificación solar.** Según Shatat y Riffat<sup>22</sup>, en el proceso de humidificación y deshumidificación, el agua salina se evapora por medio de la energía térmica y la condensación del aire húmedo a presión atmosférica, como se muestra en la figura 5, donde el agua del mar se calienta en el evaporador y gotea en la parte de abajo, el aire fluye en el sentido de las manecillas del reloj entre el condensador y el evaporador pero en contracorriente a la salmuera, de esta manera la salmuera en el evaporador se enfría aumentando su concentración y el aire se condensa en el intercambiador de calor de placa plana y llega al colector, el calor de condensación se transfiere al agua de mar fría que fluye hacia el intercambiador se aumenta la temperatura de salmuera y por último el destilado se recolecta al igual que la salmuera.

<sup>22</sup> *Ibíd.*, p. 13.

**Figura 5.** Diagrama de sistema de destilación

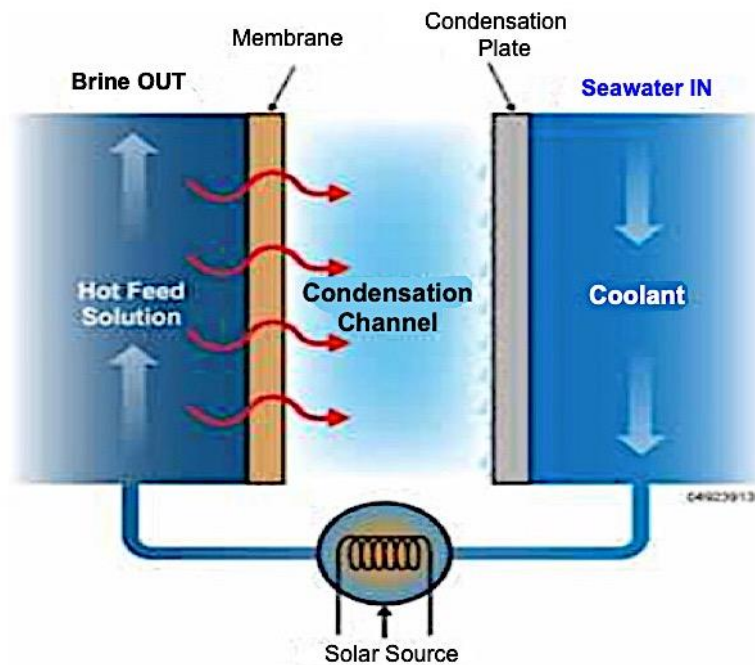


Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 14. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**1.1.2.3 Destilación de membrana.** Para Al- Karaghoulí y Kazmerski<sup>23</sup> en la destilación el agua se mueve a través de una corriente caliente y otra fría separadas por una membrana hidrofóbica, la cual es permeable al vapor del agua; el intercambio de vapor se logra por la diferencia entre las corrientes lo que permite también tener una diferencia de presión de vapor, para que así el vapor pase por la membrana hasta la condensación, como se puede observar en la figura 6.

<sup>23</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 162.

**Figura 6.** Proceso de destilación de membrana



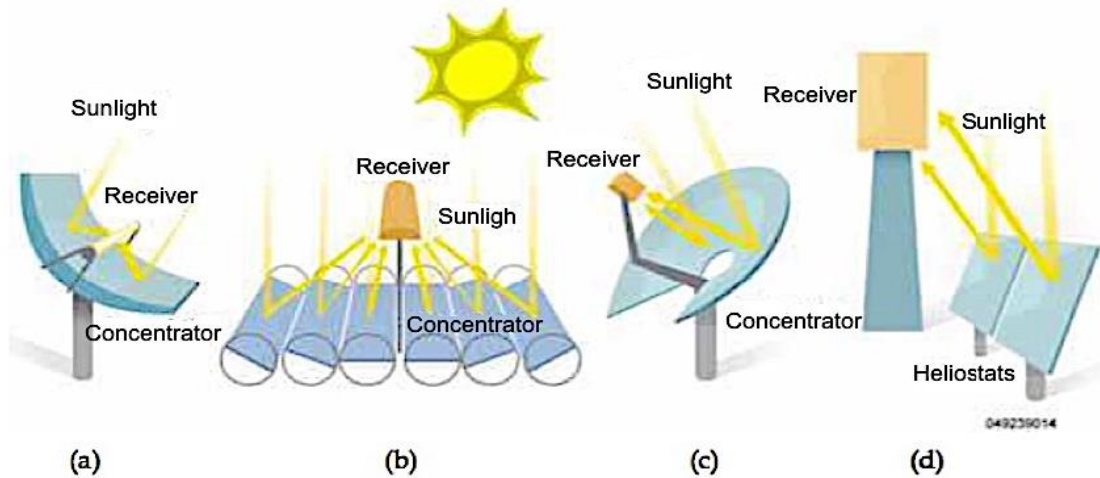
Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 162. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

**1.1.2.4 Concentración solar térmica.** De acuerdo con Al- Karaghoulí y Kazmerski<sup>24</sup>, esta tecnología se basa en la concentración de la luz solar para suministrar calor y así producir la electricidad; la mayoría de estos sistemas emplean espejos de vidrio los cuales permiten rastrear la ubicación del sol, las principales tecnologías son el cilindro parabólico, los lentes de Fresnel, sistema antena/motor y la torre de potencia, los cuales se pueden observar en la figura 7.

<sup>24</sup> Ibíd., p. 163.



**Figura 7.** Sistemas de concentración solar. (a) cilindro parabólico, (b) lentes de Fresnel, (c) antena/motor, (d) torre de energía



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 164. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

Para elegir la tecnología de desalinización del agua de mar por medio de la energía solar más conveniente se debe tener en cuenta el tamaño de la planta, el grado de salinidad del agua alimentada y la disponibilidad de electricidad<sup>25</sup>.

## 1.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

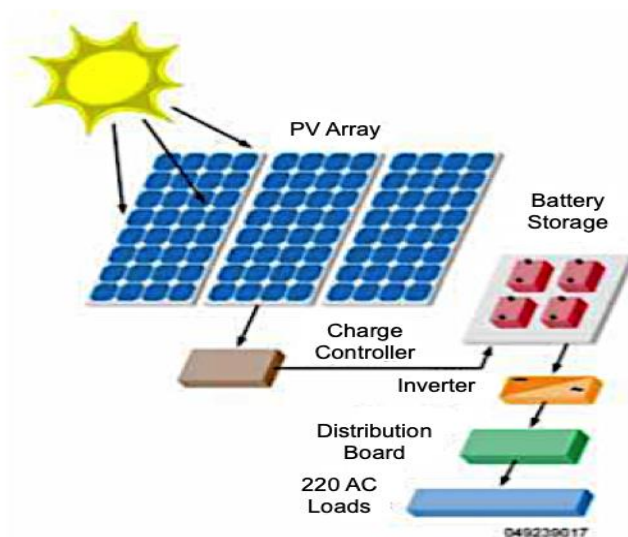
Al- Karaghoulí y Kazmerski<sup>26</sup> indican que en los sistemas fotovoltaicos la luz del sol se transforma en electricidad por medio de células solares de materiales semiconductores, que están conectadas entre ellas formando un módulo fotovoltaico suministrando la energía necesaria, cada una de las células puede llegar a producir entre 1 a 2 vatios, en la figura 8 se muestra el esquema de un sistema fotovoltaico capaz de suministrar la energía para un sistema desalinizador; también Shatat y Riffat<sup>27</sup> mencionan que estos sistemas se han hecho conocidos en el mercado gracias a la reducción de los precios haciéndola más asequible, en la figura 9 se puede observar un sistema fotovoltaico con desalinización por osmosis inversa.

<sup>25</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 12.

<sup>26</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 168.

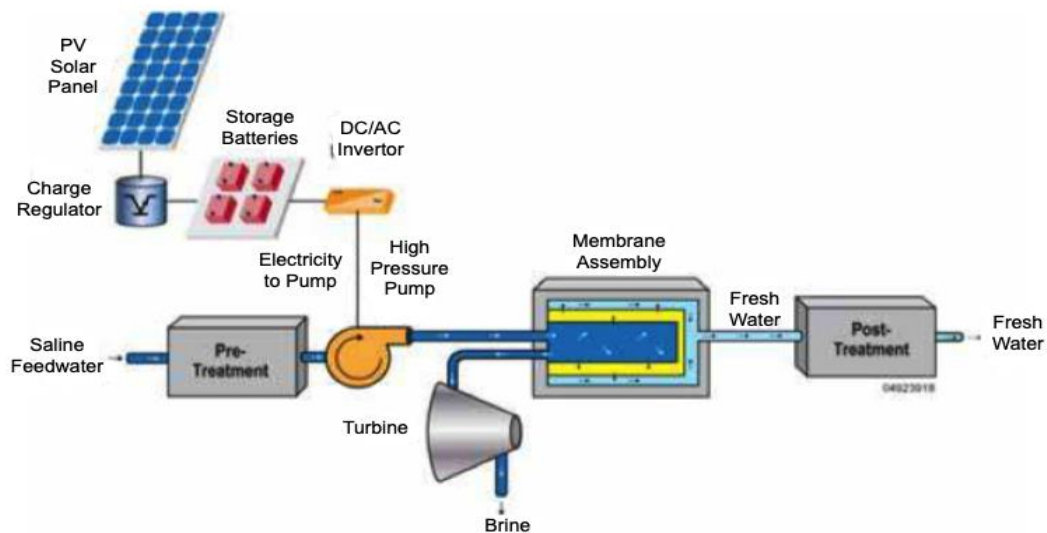
<sup>27</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 13.

**Figura 8.** Esquema de un típico sistema fotovoltaico



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 168. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

**Figura 9.** Diagrama de unidad de desalinización por osmosis inversa con un generador fotovoltaico.



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 168. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

De acuerdo con Shatat y Riffat<sup>28</sup>, esta energía puede transformar directamente la luz solar en electricidad, para esto es necesario contar con un controlador de carga, inversores, equipo de almacenamiento de energía y baterías.

Esta tecnología según Shatat y Riffat<sup>29</sup> cuenta actualmente con un amplio desarrollo, por lo que sus precios en el mercado cada vez son más asequibles, en el cuadro 1, se puede observar el despliegue de costos para la implementación de la tecnología solar fotovoltaica.

**Cuadro 1.** Elementos y costos del sistema solar fotovoltaico

S/N	Solar PV system elements	Prices in US\$	Prices in GBP £
1	PV Module per Wp	1.28	0.83
2	Inverter per Wp	0.714	0.462
3	Battery per Wp	0.213	0.138
	Subtotal	2.207	1.43
4	Charge controller 10% of total system cost	0.22	0.143
	Total	2.427	1.573

Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 14. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

### 1.3 ENERGÍA GEOTÉRMICA

Según Ali, et al.<sup>30</sup> se encuentra almacenada en la tierra y puede ser bombeada en forma de vapor y agua caliente con el fin de ser usada en la generación de electricidad; gracias a las variaciones de temperatura que se presentan en el planeta se puede usar en diferentes aplicaciones; de acuerdo con Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>31</sup> se puede aprovechar en el rango de temperaturas desde la ambiente hasta 300 °F; aunque no se distribuye comercialmente. Los almacenamientos de

<sup>28</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 14.

<sup>29</sup> <sup>29</sup> *Ibíd.*, p. 14.

<sup>30</sup> ALI, A, et al. Op. cit., p. 3.

<sup>31</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 174.

energía geotérmica se dividen en dos, de baja temperatura, menores a 150 °C y de alta temperatura, mayores a 150°C. La energía se extrae por medio de intercambiadores de calor fabricados con materiales perdurables y posicionados en el suelo, permitiendo la transferencia de calor; asimismo Ali, et al.<sup>32</sup> en el 2010 la energía geotérmica abasteció aproximadamente a 60 millones de personas en 24 países con 10000 megavatios de energía.

Para la desalinización Ali, et al.<sup>33</sup> menciona que se pueden usar los pozos geotérmicos de más de 100 m de profundidad. Si una fuente geotérmica presenta alta presión puede usarse directamente para impulsar la desalinización mecánica o si son fluidos geotérmicos de alta temperatura puede usarse para la generación de electricidad y así manejar plantas de desalinización de ósmosis inversa o electrodiálisis; además el recurso geotérmico posibilita el abastecimiento de energía térmica todo el día ininterrumpidamente, el inconveniente es que necesita de una excavación de precio elevado.

Noorollahi y Taghipoor<sup>34</sup> indica que los pozos de petróleo abandonados son considerados fuentes de calor geotérmicas de baja temperatura, adicionalmente son inútiles pero necesitan un diseño adecuado para extraer el calor.

## **1.4 ENERGÍA EÓLICA**

De acuerdo con De la Cruz, Valencia y Vanegas<sup>35</sup>, tiene amplia posibilidad de ser usada en áreas costeras, montañosas e islas para la realización de plantas de desalinización, pues la mayoría de los países poseen terrenos con recursos eólicos, suministrando energía de forma eléctrica o mecánica, para esto es de vital importancia seleccionar la ubicación adecuada de las plantas. Se ha logrado posicionar como una de las fuentes con mayor progreso gracias a su confiabilidad y accesibilidad en países como China, Tailandia, Estados Unidos y Emiratos Árabes.

---

<sup>32</sup> ALI, A, et al. Op. cit., p. 3.

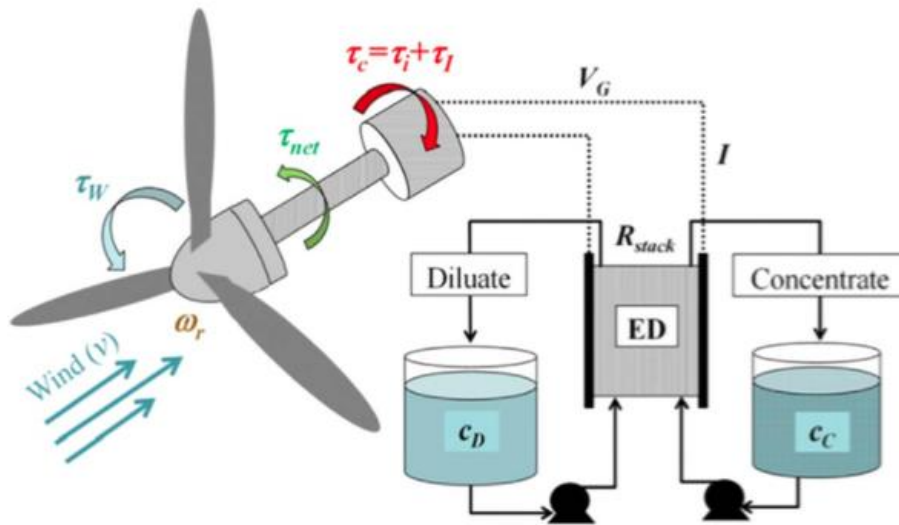
<sup>33</sup> *Ibíd.*, p. 3.

<sup>34</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Op. cit., p. 69.

<sup>35</sup> DE LA CRUZ, Jhonatan; VALENCIA, Guillermo Y VANEGAS, Marley. Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia. En: *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*. Barranquilla. [SciELO]. Junio, 2018. vol. 26. 2018. p. 319-328. ISSN 0718-3305. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo pdf. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000200319>.

Para Ali, et al.<sup>36</sup> algunos experimentos han ayudado a determinar el sistema que mejor se acopla a la energía eólica para producir agua potable como se observa en la figura 10.

**Figura 10.** Esquema de sistema Viento-Electrodialisis (ED) para la desalinización del agua



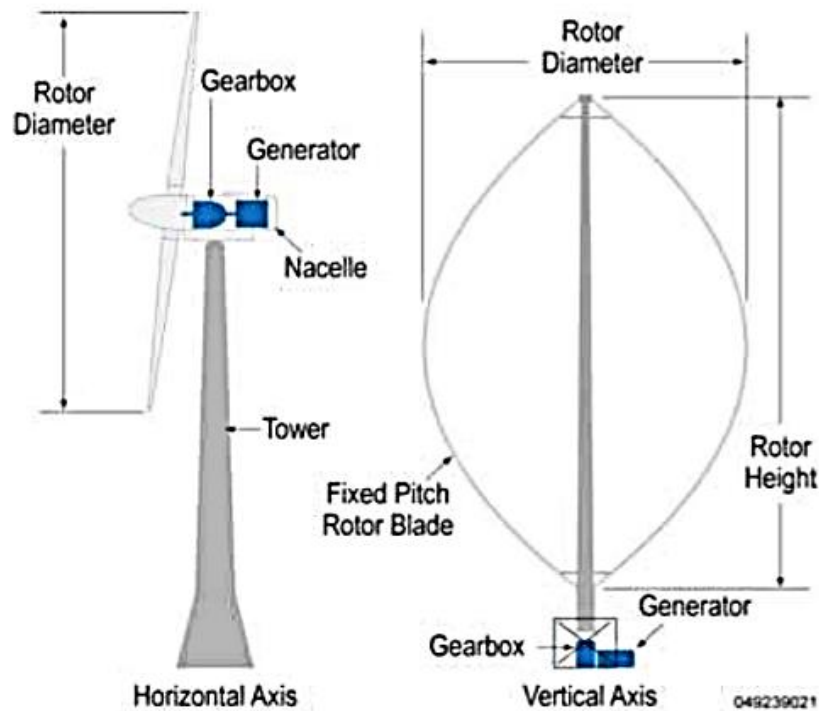
Fuente: ALI, A., et al. Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Enero, 2018. vol. 81. 2018. p. 2. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>.

Según Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>37</sup>, hay varios tipos de aerogeneradores, en los que se puede distinguir entre tipos de turbinas accionadas generalmente por fuerzas de arrastre y las impulsadas por fuerzas de elevación; además se encuentran turbinas con ejes de rotación paralelos a la dirección del viento (horizontal) y con ejes perpendiculares a la dirección del viento (vertical), como se puede observar en la figura 11.

<sup>36</sup> ALI, A, et al. Op. cit., p. 7.

<sup>37</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 172.

**Figura 11.** Configuración vertical y horizontal de aerogeneradores



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 173. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>38</sup>, menciona que las turbinas impulsadas por fuerzas de arrastre tiene una eficiencia más baja que las de las impulsadas por fuerzas de elevación, por lo que de estas últimas son todas las turbinas modernas; la desalinización con energía eólica tiene ciertas características ya que su disponibilidad no es continua, por lo que debe poder adaptarse a la disponibilidad de la energía o así mismo contar con un sistema de respaldo.

Según Ali, et al.,<sup>39</sup> se han desarrollado nuevos métodos en donde se fusionan las energías, pero la más utilizada ha sido la energía solar en ósmosis inversa, en donde la energía solar se transforma en electricidad suministrando energía a la bomba de baja y alta presión, de igual manera la energía eólica proporcionada por

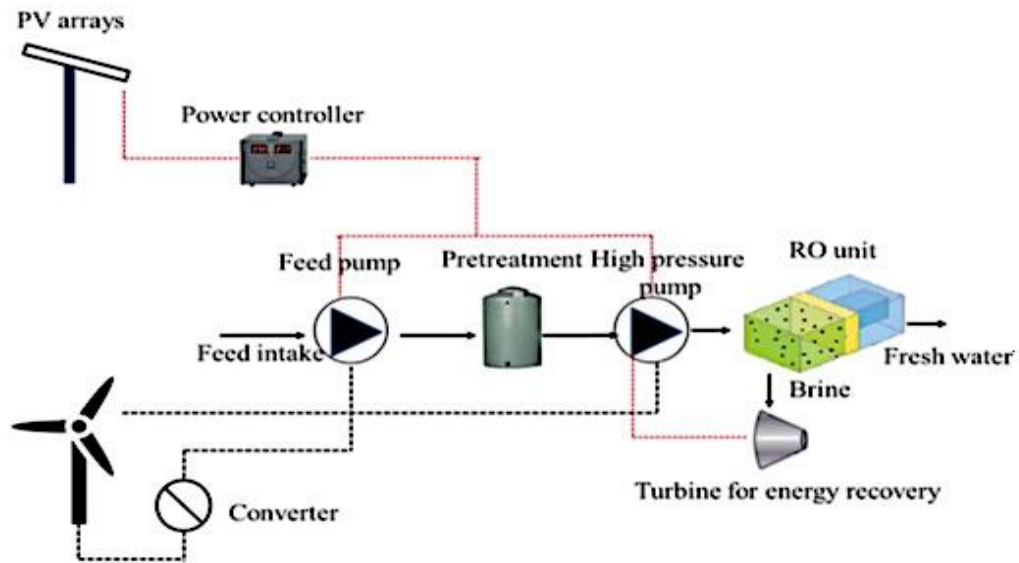
---

<sup>38</sup> *Ibíd.*, p. 172.

<sup>39</sup> ALI, A., et al. *Op. cit.*, p. 5.

una turbina puede lograr operar una bomba de alta presión como se puede ver en la figura 12.

**Figura 12.** Diagrama de un sistema de ósmosis inversa impulsado por energía solar/eólica



Fuente: ALI, A., et al. Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. En: Renewable and sustainable energy reviews. [ScienceDirect]. Enero, 2018. vol. 81. 2018. p. 2. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>.

## 1.5 CRITERIOS DE SELECCIÓN Y COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Como lo menciona Ali, et al.,<sup>40</sup> para elegir la fuente de energía apropiada se deben tener en cuenta algunos aspectos como el económico, ambiental, de seguridad y el potencial de energía renovable en el área o región, tamaño de la planta. Además Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>41</sup> menciona que la unión de las energías renovables y la desalinización es clave para lograr el abastecimiento de agua y energía de manera económica, eficiente y amigable con el medio ambiente; todos estos aspectos limitarán las opciones. Entre el 30 % y 60% de los costos operativos podrían llegar a corresponder a los costos de energía, en consecuencia el tipo de energía y sus posibles variaciones repercutirá de manera importante en el costo final para la desalinización.

<sup>40</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>41</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. *Op. cit.*, p. 150.

Según Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>42</sup>, debido a que el costo de la energía es relevante, las energías renovables presentan una alternativa de producción de energía para las plantas desalinizadoras, pero no resultan ser del todo económicas pues el recurso como tal es gratis, pero la tecnología para su recolección es costosa; en el cuadro 2 se puede observar una comparación entre los sistemas con energías convencionales y los de renovable, en donde el costo de capital es más elevado para el de energía renovable pero en el de energía es el menor.

**Cuadro 2.** Distribución de costos para sistemas impulsados con energía convencional y renovable.

Type	Capacity / Productivity	Water Cost (\$/m <sup>3</sup> )	Description
Solar Stills	4 L/m <sup>2</sup> d	23.80	20 yrs lifetime, collector cost: \$315/m <sup>2</sup> , 5% interest rate
Multi-effect Stills	12 L/m <sup>2</sup> d	9.95	Storage module, 20 year lifetime, 5% interest rate
Multi-effect Stills	20 L/m <sup>2</sup> d	< 9.0*	Non-corroding polymer absorbers, storage, 24-hour operation

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 178. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

De igual manera en la siguiente tabla 1 se comparan los sistemas de RO y MSF impulsadas por energía convencional y otras con renovables, la distribución de costos, en inversión es más alta para las renovables pero más bajos en costo de energía.

---

<sup>42</sup> *Ibíd.*, p. 176.



**Tabla 1.** Costos para sistemas de desalinización convencionales (RO y MSF) y para sistemas impulsados por energía renovable.

Tipo de proceso	Costo de capital (%)	Costo operacional (%)	Costo de energía (%)
<b>Convencional (RO)</b>	22 – 27	14 – 15	59 – 63
<b>Convencional(MSF)</b>	25 – 30	38 – 40	33 – 35
<b>Renovable</b>	30 – 90	10 – 30	0 – 10

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 177. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>. (\*)

## 1.6 IMPLEMENTACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN COLOMBIA

De acuerdo con Gómez y Ribó<sup>43</sup> la demanda energética de Colombia se encuentra en constante crecimiento, del año 1975 al 2012 Colombia presentó un aumento en más del 500% de consumo en energía eléctrica, pasando de 11.275 GWh a 59.988 GWh, siendo un sector de alto movimiento. El 78% de la energía usada en transporte, industria, residencial, gobierno y empresas es suministrado por combustibles fósiles durante el 2012.

Según Superservicios<sup>44</sup> el servicio de energía eléctrica en el país se divide entre los usuarios del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y los de las áreas geográficas que no se encuentran conectados al SIN, es decir las ZNI (Zonas no interconectadas); de acuerdo con el Ministerio de Minas y energía<sup>45</sup> el SIN “es el sistema compuesto por los siguientes elementos conectados entre sí: las plantas y los equipos de generación, la red de interconexión, las redes regionales e

(\*)Nota: Información de la fuente principal traducida por el autor

<sup>43</sup> GÓMEZ, Tomás y RIBÓ, David. Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. En: Renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct]. Valencia, España. Julio, 2018. vol. 90. 2018. p. 132. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>.

<sup>44</sup> SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS - SUPERSERVICIOS. Zonas no interconectadas – ZNI: Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica. [sitio web]. Bogotá.co. Septiembre, 2017. p. 3. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Sep/diagnosticozni-superservicios-oct-2017.pdf>.

<sup>45</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Ley 143 (1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. Diario oficial no. 41434. 12, julio, 1994. Art 11. Cap II.

interregionales de transmisión, las redes de distribución, y las cargas eléctricas de los usuarios”.

Superservicios<sup>46</sup> menciona que las ZNI a pesar de no estar conectadas al Sistema Interconectado Nacional, estas cuentan con generación de energía de manera local, abasteciéndose principalmente de combustibles fósiles como el diésel; estas zonas en su mayoría no cuentan con la infraestructura ni transporte, además de su baja densidad poblacional y problemas socioeconómicos, es por esto que estas zonas son focos de proyectos para mejorar el servicio de energía eléctrica por medio de las energías renovables.

IPSE<sup>47</sup> nos permite observar en un mapa 1, se puede observar cuales son las zonas no interconectadas, algunas de estas son: la Alta Guajira, Choco, Amazonas, entre otros.

---

<sup>46</sup> SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS – SUPERSERVICIOS. Op. cit., p. 3.

<sup>47</sup> INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS – IPSE. Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia. [sitio web]. Julio, 2014. p. 5. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>.



Gómez y Ribó<sup>49</sup> agregan que al ser el recurso hídrico el más usado, hace susceptible al país a variaciones de producción de electricidad, dados los fenómenos meteorológicos como el de El Niño y La Niña que pueden generar variaciones entre 45% y 95% en la producción de energía aunque estas variaciones son apoyadas por la producción de energía térmica.

Para Villada, López y Muñoz<sup>50</sup> a pesar del alto potencial de Colombia en cuanto a las energías renovables, este no se ha evaluado por completo para cada uno de los recursos, por ejemplo los ríos para hidroeléctricas pequeñas son numerosos, con capacidad de producir aproximadamente 5GW, la energía eólica tiene capacidad de 18 GW tan solo en la Guajira y la energía solar produce niveles de entre 1200 y 2200 kWh/m<sup>2</sup>/año; a pesar del potencial mareomotriz de Colombia Gómez y Ribó<sup>51</sup> indican que no se adelanta ningún tipo de proyecto.

Según De la Cruz, Valencia y Vanegas<sup>52</sup> en un estudio sobre el potencial eólico de Colombia en 1999, en el que destaca la región de la Guajira, donde se realiza la construcción del primer parque eólico en el país nombrado JEPÍRACHI, el cual abastece el 0,1% de los requerimientos energéticos en el país con una generación de 50GW por año.

Pero Villada, López y Muñoz<sup>53</sup> agregan que debido a la falta de incentivos por parte del gobierno, no hay suficientes proyectos que permitan explotar el potencial de la energía renovable en Colombia para lograr un mercado de competitividad eléctrica, pues en su mayoría (70% aproximadamente) es manejado por grandes compañías; aunque gracias a la Ley 1715 de 2014<sup>54</sup> que reglamenta la incorporación de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, se ha permitido según De la Cruz, Valencia y Vanegas<sup>55</sup> la promoción de

---

<sup>49</sup> GÓMEZ, Tomás y RIBÓ, David. Op. cit., p. 132.

<sup>50</sup> VILLADA, Fernando; LÓPEZ, Jesús M. y MUÑOZ, Nicolás. Effects of incentives for renewable energy in Colombia. En: Ingeniería y universidad. [EBSCOhost]. Julio, 2017. vol. 21. 2017. p. 94-108. ISSN 0123-2126. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2118/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=7e6f5523-8601-400a-88d8-03a524257000%40sdc-v-sessmgr06>.

<sup>51</sup> GÓMEZ, Tomás y RIBÓ, David. Op. cit., p. 133.

<sup>52</sup> DE LA CRUZ, Jhonatan; VALENCIA, Guillermo Y VANEGAS, Marley. Op. cit., p. 320.

<sup>53</sup> VILLADA, Fernando; LÓPEZ, Jesús M. y MUÑOZ, Nicolás. Op. cit., p. 97.

<sup>54</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Ley 1715 (2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. 2014. Cap I.

<sup>55</sup> DE LA CRUZ, Jhonatan; VALENCIA, Guillermo Y VANEGAS, Marley. Op. cit., p. 320.

las energías y el adelanto de proyectos para la instalación de tres parques más en la Guajira; Gómez y Ribó<sup>56</sup> agregan que estas inversiones tienen incentivos fiscales, deducciones de impuesto de renta, incentivos contables, entre otros.

---

<sup>56</sup> GÓMEZ, Tomás y RIBÓ, David. Op. cit., p. 132.

## 2. PROCESOS DESALINIZADORES

Para Curcio, et al.<sup>57</sup> el agua es uno de los recursos que más abunda en la tierra, 96,7% es de mar, lo que evidencia que la cantidad disponible de agua para consumo es muy reducida y en su mayoría se encuentran congeladas en glaciares. Asimismo Zuñiga, et al.<sup>58</sup> indica que la contaminación de las fuentes y los grandes depósitos de agua de mar disponible han fomentado el interés de la desalinización por medio de diferentes métodos y tecnologías; además Curcio<sup>59</sup> agrega que la desalinización de agua de mar, se ha convertido en una de las formas más confiable y económicamente sostenible que puede producir agua potable.

La desalinización igualmente llamada como desalación, según Zúñiga, et al.<sup>60</sup> es aquella cuya agua de mar tiene una concentración de salinidad de alrededor de 35,000 ppm; Shatat y Riffat<sup>61</sup> agregan que esta salinidad podría llegar hasta los 45000 ppm, rango que generalmente tiene el agua del planeta.

De acuerdo con Shatat y Riffat<sup>62</sup>, el agua de mar por medio de la desalinización se convierte en agua potable para satisfacer diferentes necesidades tanto domésticas como industriales. En la desalinización el agua salina se separa en dos partes, una con baja concentración de sales disueltas a la que se llama agua dulce y otra con una concentración mayor que la que se alimenta al inicio del proceso.

Para Veza<sup>63</sup> la desalinización es creada en función de eliminar la sal proveniente del agua de mar a la cual se le debe extraer previamente los componentes

---

<sup>57</sup> CURCIO, E, et al. Membrane technologies for seawater desalination and brackish water treatment. En: Advances in membrane technologies for water treatment. Mterials, processes and applications. Woodhead, 2015. p. 411. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00013-7>.

<sup>58</sup> ZÚÑIGA, Juan Francisco, et al. La energía nuclear para la desalinización del agua de mar. En: Nucleus. [EBSCOhost]. La Habana, Cuba. no 38. 2005. p. 9. ISSN 0864-084X. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2109/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=10&sid=1f9e3d4a-3cc8-4bae-9b58-6015c367affe%40sessionmgr104>.

<sup>59</sup> CURCIO, E, et al. Op. cit., p. 411.

<sup>60</sup> ZÚÑIGA, Juan Francisco, et al. Op. cit., p. 10.

<sup>61</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 1.

<sup>62</sup> *Ibíd.*, p. 1.

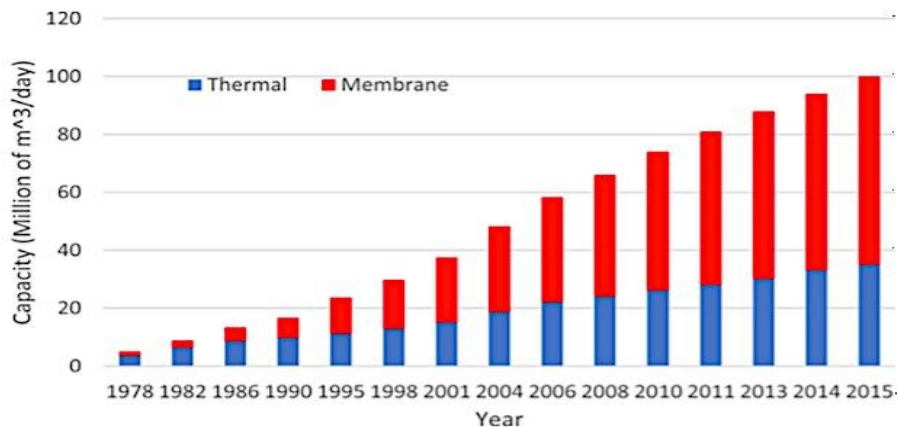
<sup>63</sup> VEZA, Jose M. Desalination in the Canary Islands: an update. En: Desalination. [Science Direct]. 1, abril, 2001. vol. 133. 2001. p. 264. ISSN 0011-9164. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00106-0).

indeseables, aunque en lo posible se debe buscar agua proveniente de playas o pozos costeros que proporcionen agua con pocos requisitos de pretratamiento.

Noorollahi, Taghipoor y Sajadi<sup>64</sup> indican que la capacidad de desalinización mundial en el 2007 fue de 47,6 millones de m<sup>3</sup>/día, en el 2008 se evidencia un aumento a 28 millones de m<sup>3</sup>/día, para el 2011 llegó a 65,2 millones de m<sup>3</sup>/día y en 2012 alcanzó un valor de 74,8 millones de m<sup>3</sup>/día. En la gráfica 2 se puede observar el aumento de la desalinización en los últimos 40 años en un porcentaje de 55 cada año en promedio.

Se espera que para el año 2020, de acuerdo con Al-Sharrah, Lababidi y Al-Anzi<sup>65</sup> la capacidad de desalinización siga en crecimiento y aumente en un 40% a más de 6605 galones por día; claro que según Noorollahi, Taghipoor y Sajadi<sup>66</sup> esta capacidad depende de la región en que se ubique la planta, como se observa en la gráfica 3 en donde la mitad de la capacidad de desalinización mundial se da en el Medio Oriente.

**Gráfica 2.** Capacidad de desalinización mundial de acuerdo a la tecnología (térmica/de membrana)



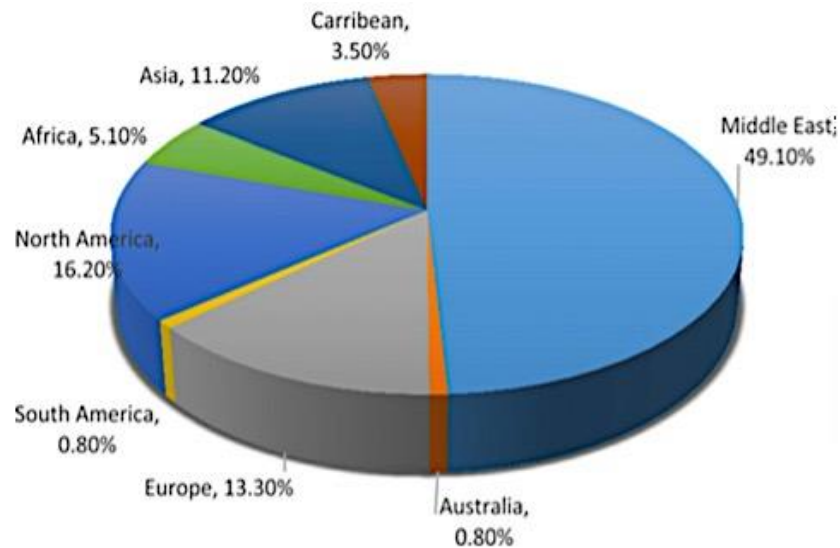
Fuente: NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. En: Geothermics. [ScienceDirect]. Mayo 2017. Vol 67. 2017. p. 67. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.008>.

<sup>64</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Op. cit., p. 66.

<sup>65</sup> AL-SHARRAH, Ghanima; LABABIDI, Haitham y AL-ANZI, Bader. Environmental ranking of desalination plants: the case of the Arabian Gulf. En: Toxicological & environmental chemistry. [EBSCOhost]. 14, septiembre, 2017. vol. 99. 2017. p. 1056. [Consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1080/02772248.2016.1249369>.

<sup>66</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Op. cit., p. 66.

**Gráfica 3.** Capacidad de desalinización de acuerdo a la región



Fuente: NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. En: Geothermics. [ScienceDirect]. Mayo 2017. Vol 67. 2017. p. 67. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.008>.

Según Veza<sup>67</sup> para el pretratamiento de la desalinización del agua de mar se puede ver implementado procesos como la cloración, el ajuste de pH, filtración de arena usada cuando son tomas de mar abierto ya que puede traer consigo una cantidad significativa de sólidos suspendidos, la dechloración y la filtración de cartucho; todo esto con el fin de evitar problemas de operación en las plantas por el bioencrustamiento; este último de acuerdo con Missimer, et al.<sup>68</sup> se da por la formación de incrustaciones en las membranas gracias a la presencia de materiales orgánicos como algas, bacterias, carbón orgánico y partículas exopolímeras.

No obstante, Jiménez, et al.<sup>69</sup> menciona que aunque se incluye el pretratamiento las membranas se ensucian con escamas minerales, materia biológica, partículas

<sup>67</sup> VEZA, Jose M. Op. cit., p. 264.

<sup>68</sup> MISSIMER, Thomas M. Hydrogeology, water quality, and microbial assessment of a coastal alluvial aquifer in western Saudi Arabia: potential use of coastal wadi aquifers for desalination water supplies. En: Hydrogeology journal. [EbscoHost]. 18, noviembre, 2014. vol. 22. 2014. p. 1921. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1168-3>.

<sup>69</sup> JIMÉNEZ, Silvia, et al. Treatment of cleaning waters from seawater desalination reverse osmosis membranes for reutilization purposes. Part I: Application of Fenton process. En: Journal of water



coloidales y compuestos orgánicos insolubles, todo esto genera pérdidas en el flujo de producción; por esta razón se han implementado limpiezas, que pueden ser de mantenimiento regular, ácida contra escamas inorgánicas severas o alcalina contra ensuciamiento orgánico de las membranas.

De acuerdo con Missimer, et al.<sup>70</sup> se ha demostrado que, para reducir costos en la desalinización de los pretratamientos y limpiezas, el impacto que se genera por la toma de agua en mar abierto en donde se arrastran organismos marinos y en el contenido de las algas, bacterias marinas en hasta un 98%, carbono orgánico en más del 50% y partículas exopolímeras transparentes en hasta un 100%, el bombeo de agua por medio de los acuíferos costeros es una opción efectiva. Las partículas exopolímeras transparentes son una sustancia que está formada por ácidos polisacáridos los cuales provienen de la secretación de algas y bacterias, teniendo un carácter pegajoso.

Para Zúñiga, et al.<sup>71</sup> “las tecnologías de desalinización han sido bien establecidas desde mediados del siglo XX y son ampliamente desarrolladas en muchas partes del mundo que tienen problemas con la falta de agua”.

Los procesos de desalinización para Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>72</sup> en general se clasifican en dos grandes grupos uno es el térmico en el que se da cambio de fase y el otro es el de membranas, y en cada uno de ellos se encuentran los diferentes procesos, todos con requerimiento energético para su funcionamiento. Ver en tabla 2.

- **Procesos térmicos**

- Destilación flash de varias etapas (MSF)
- Destilación multiefecto (MED)
- Comprensión de vapor (VC)
  - Térmica (TVC)
  - Mecánica (MVC)

- **Procesos de membrana**

- Ósmosis inversa (RO)

---

process engineering. [Science Direct]. Octubre, 2017. vol. 19. 2017. p. 248. ISSN 22147144. [consultado 4, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.005>.

<sup>70</sup> MISSIMER, Thomas M. Op. cit., p. 1921.

<sup>71</sup> ZÚÑIGA, Juan Francisco, et al. Op. cit., p. 9.

<sup>72</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 151.

➤ Electrodiálisis (ED)

**Tabla 2.** Datos importantes de los procesos de desalinización

	<b>MSF</b>	<b>MED</b>	<b>MED-TVC</b>	<b>MVC</b>	<b>RO</b>	<b>ED</b>
<b>Temperatura de operación (°C)</b>	< 120	< 70	< 70	< 70/1/	< 45	< 45
<b>Tipo de energía</b>	Vapor (calor)	Vapor (calor)	Vapor	Mecánica (energía eléctrica)	Mecánica (energía eléctrica)	Energía eléctrica
<b>Consumo de energía térmica (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	12	6	21	No aplicable	No aplicable	No aplicable
<b>Consumo de energía eléctrica (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	3,5	1,5	1,5	8 - 14	4 - 7	1,0
<b>Contenido de sales (ppmTDS)</b>	30000 - 100000	30000 - 100000	30000 - 100000	30000 - 50000	1000 - 45000	100 - 3000
<b>Calidad del agua producida (ppm TDS)</b>	< 10	< 10	< 10	< 10	< 500	< 500
<b>Capacidad típica (m<sup>3</sup>/d)</b>	5000 - 60000	500 - 12000	100 - 20000	10 - 2500	1 - 10000	1 - 12000

Fuente: ZÚÑIGA, Juan Francisco, et al. La energía nuclear para la desalinización del agua de mar. En: Nucleus. [EBSCOhost]. La Habana, Cuba. no 38. 2005. p. 9. ISSN 0864-084X. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2109/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=10&sid=1f9e3d4a-3cc8-4bae-9b58-6015c367affe%40sessionmgr104>. (\*)

En la tabla 2, se puede observar cómo se evalúa cada uno de los procesos de acuerdo a la temperatura de operación, el tipo de energía, su consumo de energía y la calidad de agua que producen. Los procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis presentan una calidad del agua menor (<500 ppm) con respecto a los demás (<10 ppm), pero son las que tiene el menor consumo de energía.

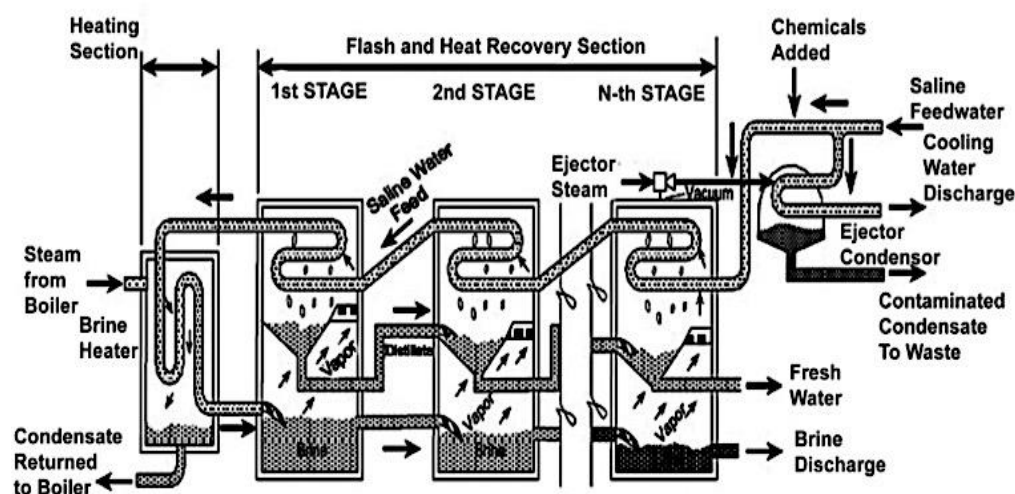
(\*) Información de la fuente principal transcrita.

## 2.1 PROCESOS TÉRMICOS

De acuerdo con Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>74</sup> este tipo de procesos son similares al ciclo natural que tiene el agua, cuando el agua de mar se somete a calor produciendo el vapor de agua, el cual se condensa para obtener el agua dulce. Los más empleados son el MSF, MED y VC; estos dos últimos están ampliando su rol en la desalinización pues el MSF es uno de los más utilizados mundialmente. Estas tecnologías desalinizadoras necesitan de energía ya sea térmica o mecánica para lograr la evaporación del agua.

**2.1.1 Destilación flash de varias etapas (MSF).** Shatat y Riffat<sup>75</sup>, mencionan que por medio de este proceso actualmente se produce cerca del 64% de la producción total de agua desalinizada en el mundo. En la figura 13 se puede observar el proceso MSF, en el que el agua que se alimenta es calentada en un calentador de salmuera hasta una temperatura menor a la de ebullición, el agua caliente pasa por una serie de recipientes donde la baja presión hace que el agua hierva y se evapore, este vapor se convierte en agua dulce por medio de un condensador; normalmente una planta MSF tiene entre 15 y 25 etapas.

**Figura 13.** Destilación instantánea de múltiples etapas (MSF)



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 3. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

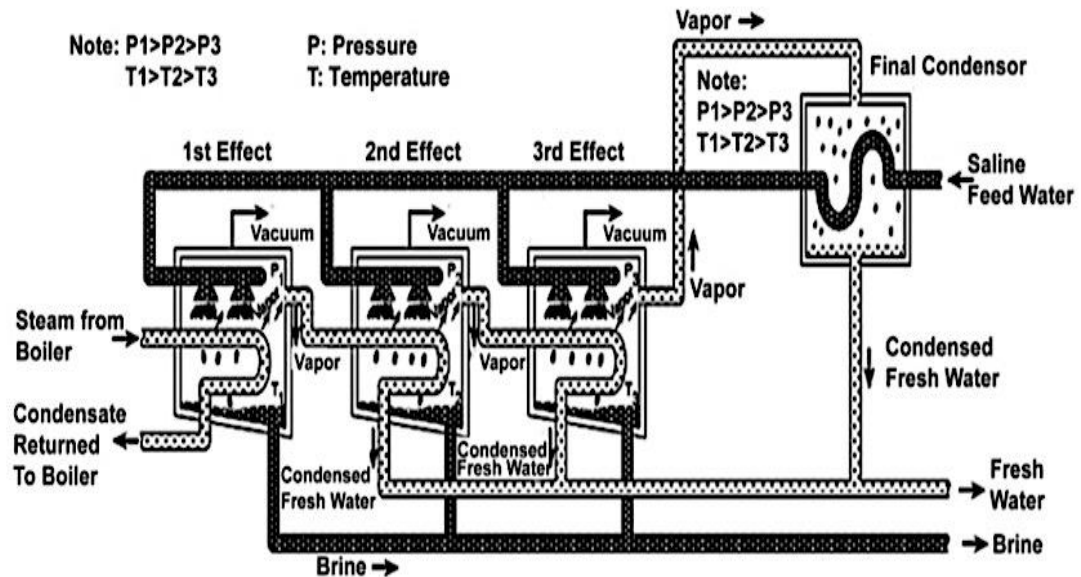
<sup>74</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 152.

<sup>75</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 3.

**2.1.2 Destilación de múltiples efectos (MED).** Para Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>76</sup>, es el método más antiguo de destilación para la desalinización de agua de mar, de toda el agua desalada en el mundo el 3,5% es producida por plantas de destilación de múltiples efectos, este método tiene menor consumo de energía que los MSF. Su funcionamiento se basa en el principio de reducción de la presión en cada etapa.

Según Shatat y Riffat<sup>77</sup> el agua de mar es alimentada y se lleva a punto de ebullición después de que es precalentada en tubos, para promover la evaporación se rocía sobre los tubos de evaporador, el agua evaporada sale con un bajo porcentaje de sal y pasa a la siguiente etapa, el vapor se condensa del otro lado como agua dulce, como se observa en la figura 14.

**Figura 14.** Planta de destilación de múltiples efectos (MED)



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 4. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

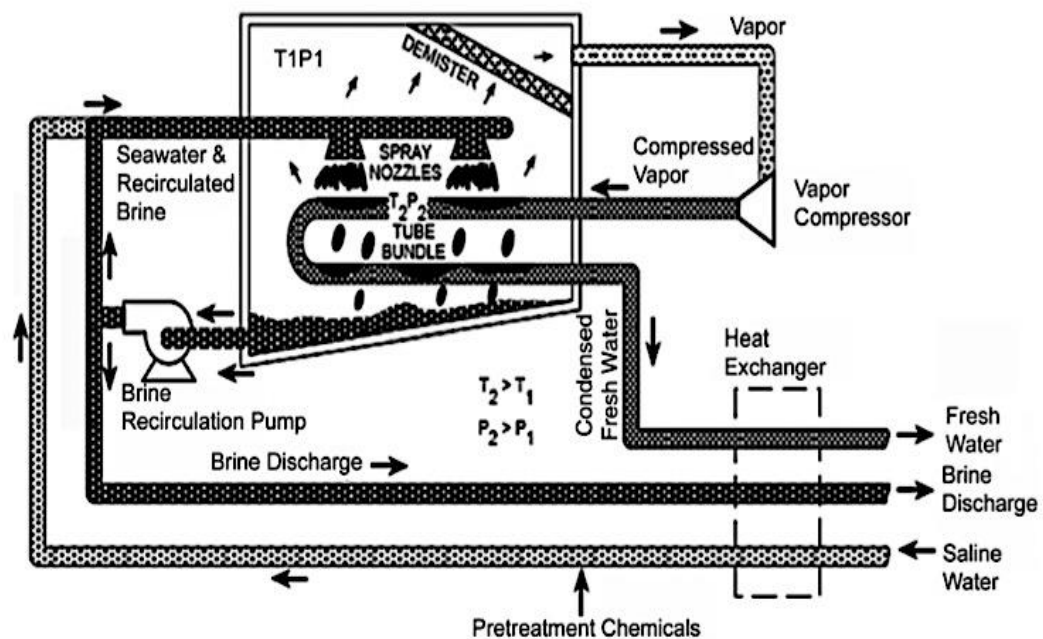
<sup>76</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 152.

<sup>77</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 4.

**2.1.3 Evaporación por compresión de vapor (VC).** De acuerdo con Shatat y Riffat<sup>78</sup>, para lograr la evaporación del agua de mar en este caso el calor proviene de la compresión de vapor, se puede utilizar alguno de estos dos dispositivos, ya sea un compresor mecánico (MVC) o de vapor térmico (TVC), los cuales condensan el vapor de agua y producen el calor necesario para evaporar el agua que se alimenta a la planta.

Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>79</sup> menciona que en el método del compresor mecánico la mayoría de veces se acciona eléctricamente, ver la figura 15, mientras que en el compresor térmico un orificio tipo Venturi crea y extrae vapor de agua obteniendo una presión más baja en el depósito del agua ver figura 16; generalmente los MVC se construyen de diferentes tamaños de hasta alrededor de los 3000 m<sup>3</sup>/día y los TVC pueden llegar hasta los 20000 m<sup>3</sup>/día etapa.

**Figura 15.** Esquema de una planta de compresión de vapor mecánica (MVC)

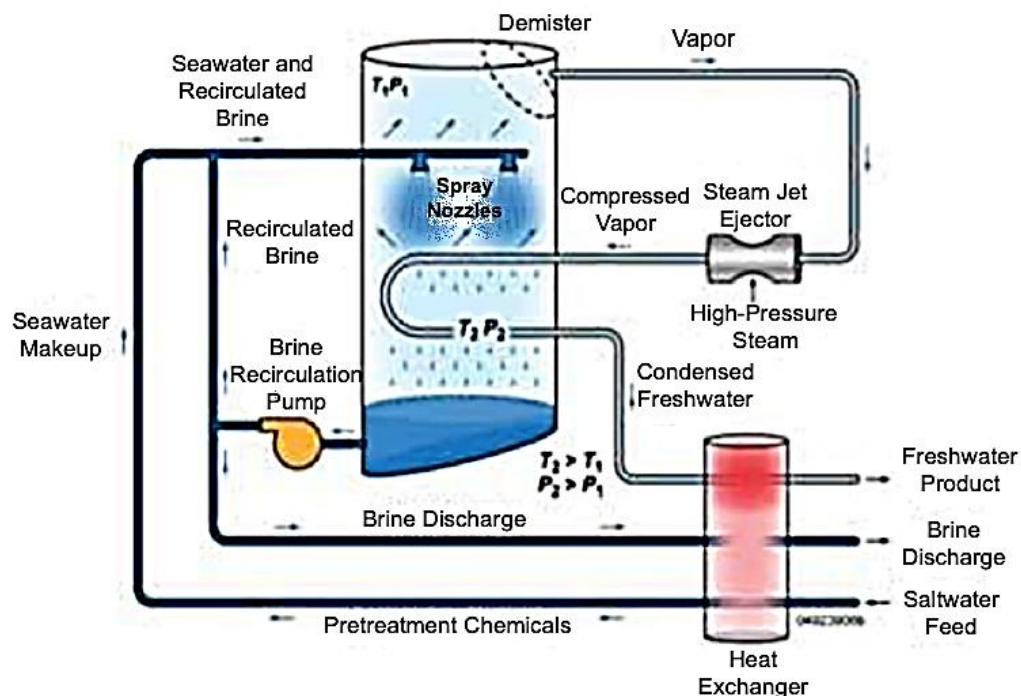


Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 5. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

<sup>78</sup> *Ibíd.*, p. 4.

<sup>79</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. *Op. cit.*, p. 153.

**Figura 16.** Esquema de una planta de compresión de vapor térmica (TVC)



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 153. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

## 2.2 PROCESOS DE MEMBRANA

Como indica Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>80</sup>, en los procesos de membrana y de filtros se permite o detiene de manera selectiva el paso de ciertos iones, de acuerdo a estas capacidades se han diseñado los procesos de desalinización.

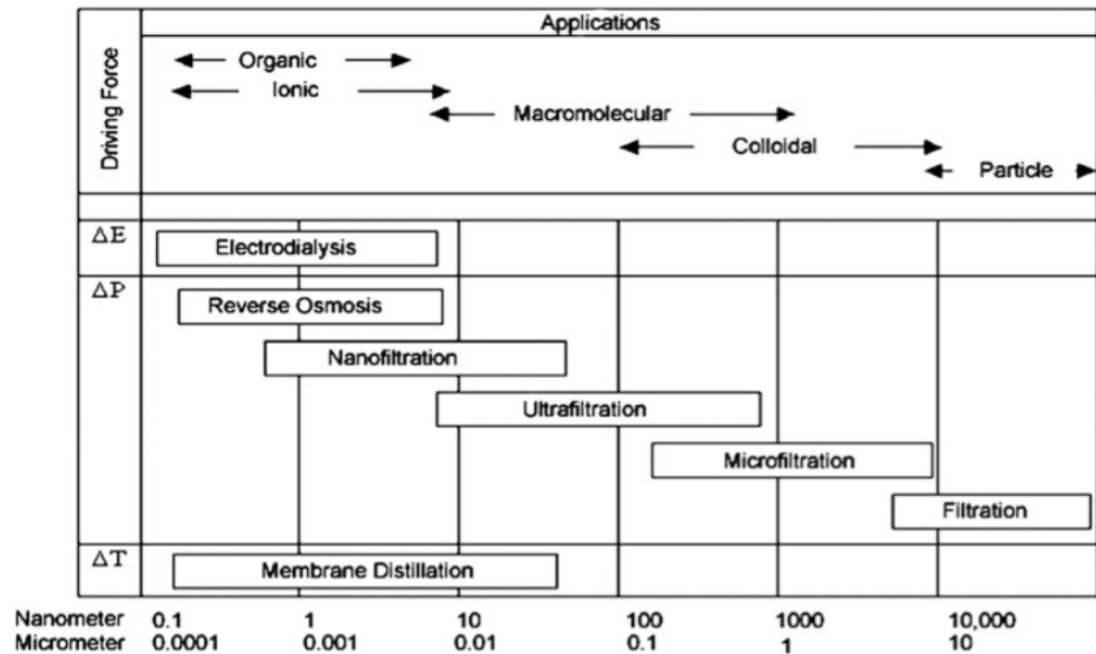
Según Shatat y Riffat<sup>81</sup> se emplea una membrana parcialmente permeable con el fin de mover el agua o sal, creando zonas de diferente concentración produciendo así el agua dulce; la diferencia entre los diferentes tipos de procesos dependerá del tamaño de los iones, moléculas y partículas que se puedan retener o dejar pasar; algunos de los procesos son la electrodiálisis, ósmosis inversa, destilación de membrana, nanofiltración, ultrafiltración, microfiltración y la filtración utilizadas para previos tratamientos al de la desalinización, ver figura 17; aunque Al-

<sup>80</sup> *Ibíd.*, p. 154.

<sup>81</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 5.

Karaghoulí y Kazmerski<sup>82</sup> agregan que comercialmente los más importantes son la ED Y RO los cuales representan más del 50% de los procesos utilizados en la desalinización.

**Figura 17.** Rango efectivo de los procesos de membrana y su aplicación



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 6. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**2.2.1 Ósmosis inversa (RO).** De acuerdo con Shatat y Riffat<sup>83</sup>, las membranas de ósmosis inversa permiten separar sales, moléculas orgánicas e inorgánicas por medio de un gradiente de presión en donde se fuerza al disolvente a pasar a través de la membrana de una zona de mayor concentración a una de baja concentración como se observa en la figura 18.

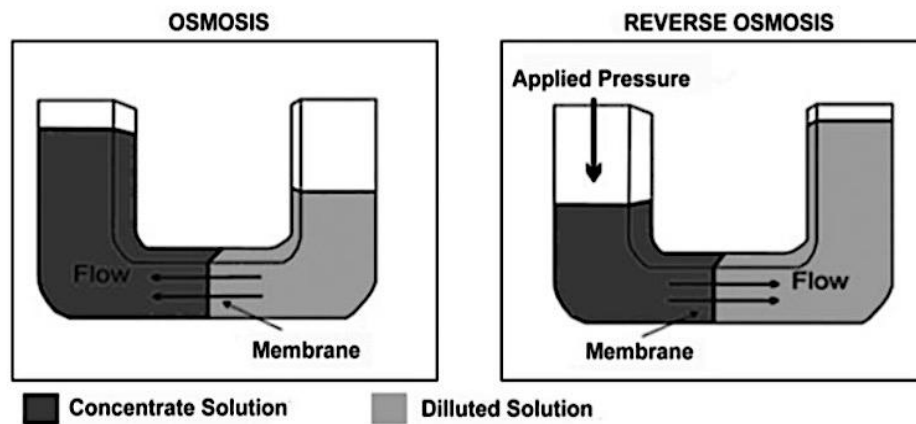
Para Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>84</sup>, la desalinización por medio del sistema OR se tiene en cuenta cuatro subsistemas: el pretratamiento, bomba de alta presión, el sistema como tal de ósmosis inversa y un post tratamiento ver figura 19.

<sup>82</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 154.

<sup>83</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 6.

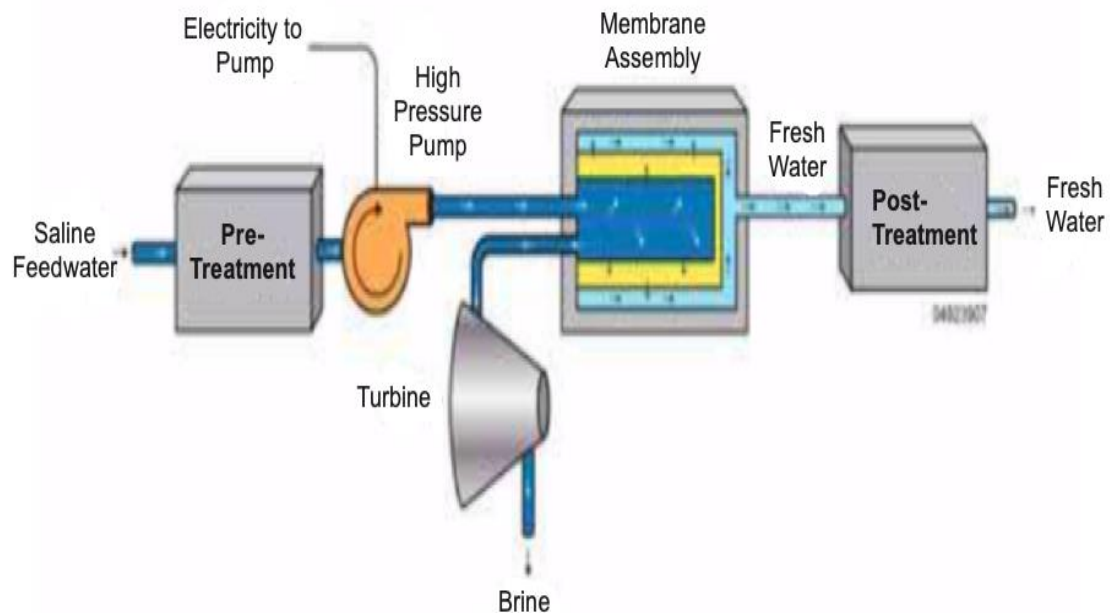
<sup>84</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 154.

**Figura 18.** Proceso de ósmosis y de ósmosis inversa



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 6. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**Figura 19.** Esquema de subsistemas proceso de ósmosis inversa



Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 155. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.



El pretratamiento, según Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>85</sup> es de gran importancia en el sistema RO ya que las membranas son sensibles a incrustaciones, normalmente se utilizan procesos de esterilización, filtración y añadidura de productos químicos, por otro lado la bomba de alta presión permite que el agua proveniente del se utilizan pretratamiento fluya por la membrana con un rango de presión de entre 55 y 82 bares; la membrana es semipermeable, siendo altamente permeable al agua pero impenetrable por la sal, para su fabricación se emplean acetatos de celulosa o polímeros de poliamida y por último el postratamiento se basa en esterilización, estabilización y enriquecimiento del agua potable.

Para Dévora, González y Ruiz<sup>86</sup> el proceso de ósmosis inversa es uno de los más sencillos para desalar con los mejores rendimientos, una planta de ósmosis inversa no es muy grande ya que el arreglo de las membranas puede ser en paralelo o en serie. Se realiza la captación de agua a la que se lleva a un pretratamiento físico y químico, luego pasa por las membranas para eliminar la sal y por último pasa a un postratamiento, ver figura 20;

Además Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>87</sup> menciona que gracias a que el sistema RO funciona a temperatura ambiente se disminuyen los problemas de corrosión e incrustación. A pesar de ser el proceso desalinizador más reciente, en 2008 se estableció como el predominante a nivel mundial (53%), seguido del MSF (25%). Generalmente la capacidad máxima de una planta de RO es de 128000 m<sup>3</sup>/día y para unidades pequeñas hasta 0,1 m<sup>3</sup>/día.

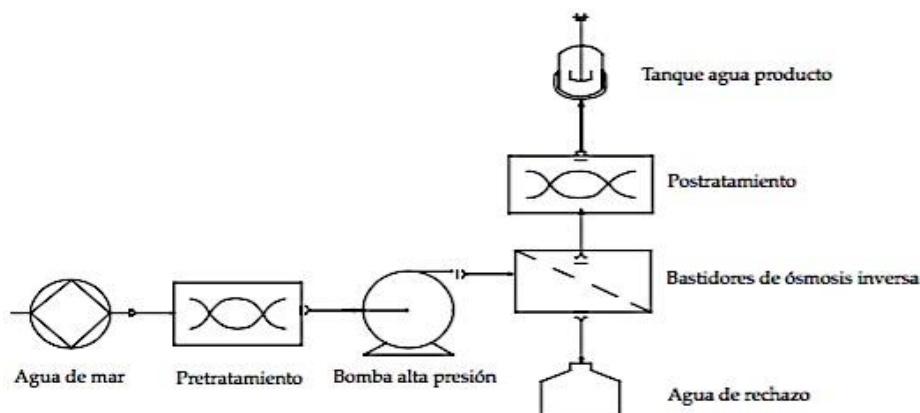
---

<sup>85</sup> *Ibíd.*, p. 155.

<sup>86</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo y RUIZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. En: *Tecnología y ciencias del agua*. [EBSCOhost]. Agosto, 2013. vol. 4. no. 3. 2013. p. 33. ISSN 2007-2422. [consultado 4, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002).

<sup>87</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. *Op. cit.*, p. 155.

**Figura 20.** Esquema general de una planta de ósmosis inversa



Fuente DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo y RUIZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. En: Tecnología y ciencias del agua. [EBSCOhost]. Agosto, 2013. vol. 4. no. 3. 2013. p. 33. ISSN 2007-2422. [consultado 4, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002).

Los procesos de membrana han disminuido sus precios, gracias a los avances y diferentes desarrollos de membranas, en la tabla 3, se puede evidenciar el costo de desalinización de acuerdo a la capacidad de la planta, este costo disminuye, entre mayor sea la capacidad de esta.

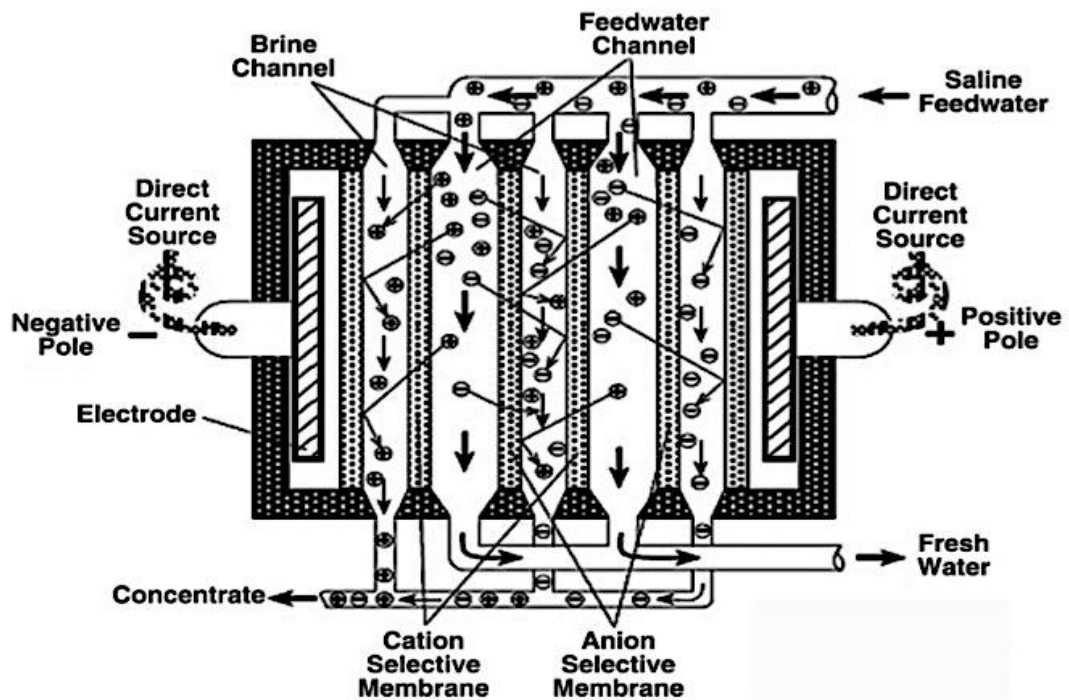
**Tabla 3.** Costo de desalinización en plantas con sistema de ósmosis inversa

Type of feed water	Capacity of desalination plant (m <sup>3</sup> /day)	Desalination cost per m <sup>3</sup> (US\$)
Brackish water	<20	5.63–12.9
	20–1200	0.78–1.33
	40 000–46 000	0.26–0.54
Seawater	<100	1.5–18.75
	250–1000	1.25–3.93
	15 000–60 000	0.48–1.62
	100 000–320 000	0.45–0.66

Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 15. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

**2.2.2 Electrodialisis (ED).** Para Shatat y Riffat<sup>88</sup> es uno de los procesos para la desalinización del agua de mar, con muchas aplicaciones tanto en la industria ambiental como bioquímica, además de ser usada para producir sal de mesa; para este proceso se utilizan membranas de intercambio iónico las cuales son cargadas eléctricamente con una diferencia de potencial eléctrico, la separación depende de que las sales disueltas en el agua de mar son iónicas, es decir cargadas ya sea positiva o negativamente, las cuales migran a los electrodos que posean su carga opuesta, como se observa en la figura 21; Dévora, González y Ruiz<sup>89</sup> agrega que el consumo de energía que presenta es proporcional a la cantidad de sales que son eliminadas del agua, de acuerdo con esto Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>90</sup> indica que no es económicamente llamativa para desalinizar agua de mar.

**Figura 21.** Movimiento de los iones en un proceso de electrodialisis



Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 9. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

<sup>88</sup> SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Op. cit., p. 8.

<sup>89</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo y RUIZ, Saúl. Op. cit., p. 34.

<sup>90</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 156.

## 2.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE PROCESO DESALINIZADOR

De acuerdo con Al-Sharrah, Lababidi y Al-Anzi<sup>91</sup>, para seleccionar el proceso de desalinización adecuado se deben tener en cuenta distintos parámetros tanto técnicos como operativos, como lo son la disponibilidad de agua, la fuente de energía haciendo una comparación de costo entre la de calor y electricidad, la demanda de agua, las especificaciones de calidad, el uso que se le va a dar ya sea industrial o doméstico, capacidad de alimentación y producción, costo de construcción, el mantenimiento y modo de operación de la planta.

Las combinaciones más favorables según Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>92</sup>, entre las energías renovables y los diferentes tipos de sistemas desalinizadores se pueden observar en el cuadro 3, en la que se puede observar que la energía solar térmica y fotovoltaica pueden promover los sistemas MSF, MED, RO Y ED; la energía eólica puede impulsar VC, RO y ED y la energía geotérmica en reservorios con temperatura moderada puede impulsar MSF y MED, mientras que los reservorios de alta presión promueven unidades de VC, RO y ED.

**Cuadro 3.** Posibles combinaciones de energía renovable

RE Resource	Desalination Process				
	MSF	MED	VC	RO	ED
Solar thermal	■	■			
Solar PV				■	■
Wind			■	■	■
Geothermal	■	■	■	■	■

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 159. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>93</sup> mencionan que en la implementación de una planta desalinizadora los costos cambian de acuerdo al acceso al mar, la salinidad, calidad la fuente de agua, proceso desalinizador y la distancia al lugar de consumo.

<sup>91</sup> AL-SHARRAH, Ghanima; LABABIDI, Haitham y AL-ANZI, Bader. Op. cit., p. 1055.

<sup>92</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 158.

<sup>93</sup> *Ibíd.*, p. 158.

Para Noorollahi, Taghipoor y Sajadi<sup>94</sup>, generalmente los procesos de membrana se emplean en las regiones cuya concentración de sólidos disueltos es menor a 35,000 ppm, como lo es los países de Europa, mientras que en lugares donde la concentración es mayor a 35.000 ppm se utilizan los procesos térmicos; teniendo en cuenta que en su mayoría los térmicos necesitan combustibles fósiles para producir energía térmica, por otro lado los de membrana requieren energía eléctrica.

## 2.4 COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROCESOS DESALINIZADORES

De acuerdo con Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>95</sup>, para obtener el costo de la desalinización del agua se debe dividir la suma de todos los costos sobre la cantidad de agua producida, los costos son: costos de capital, que incluyen directos (costos de tierra, construcción y equipo) y los indirectos (costos de seguro, legales, contingencia), costos de operación y mantenimiento que incluyen costos de energía, mano de obra, productos químicos y repuestos.

Adicionalmente Al-Karaghoulí y Kazmerski<sup>96</sup>, mencionan que el costo puede variar de acuerdo a la energía utilizada ya que es uno de los factores que determina su costo de operación, en la siguiente tabla 4 se muestra la distribución de los costos en los procesos de MSF Y RO, los cuales fueron instalados en Libia; el proceso MSF tiene el costo de capital más alto respecto al de RO, pero los costos de operación es más alto para el proceso de membrana RO ya que es más complejo en operación y mantenimiento, así mismo los costos en productos químicos, mantenimiento y reparación y mano de obra son más bajos en el MSF.

**Tabla 4.** Distribución de costos

Type of Plant	Capital Cost (%)	Energy Cost (%)	Maintenance and Repair Cost (%)	Membrane Replacement (%)	Labor (%)	Chemicals (%)
RO	31	26	14	13	9	7
MSF	42	41	8	0	7	2

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 175. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

<sup>94</sup> NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Op. cit., p. 66.

<sup>95</sup> AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Op. cit., p. 175.

<sup>96</sup> *Ibíd.*, p. 175.

Normalmente el costo del agua por unidad puede variar de acuerdo a la capacidad total de la planta de desalinización, como se muestra en la tabla 5 para diferentes capacidades y tipo de sistema desalinizador; para cada uno de los proceso de MVC el costo del agua producida disminuye al aumentar la capacidad de la planta.

**Tabla 5.** Costo del agua potable para diferentes capacidades y tipo de proceso desalinizador

Type of system and capacity (mgbd)	Product Cost (\$/gallon)
MVC (0.03)	1.894
MVC (0.13)	1.220
MVC (1.06)	0.939
MVC (1.20)	0.920
MVC (5.28)	0.174
MSF (7.13-Dual purpose)	0.292
MSF (7.13-Single purpose)	0.621
MSF (Gas turbine, Waste heat boiler)	0.545
MSF (9.99)	0.473
MED (6-Dual purpose)	0.330
MED (6-Single purpose)	0.739
MED (9.99)	0.409
MED (Gas turbine, Waste boiler)	0.496
RO (5.28, Single stage)	0.242
RO (5.28, Two stage)	0.288
RO (0.03)	0.898
RO (1.06)	0.750
RO (1.20)	0.489
RO (9.99)	0.413
RO (30)	0.208
MED- TVC (Single purpose)	0.866
MED- TVC (Dual purpose)	0.496

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 176. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

En la tabla 6 se puede observar algunos de los precios de plantas instaladas en diferentes países, impulsadas por energía eólica y con sistema desalinizador de osmosis inversa.

**Tabla 6.** Plantas desalinizadoras impulsadas por energía eólica y sistema de osmosis inversa

Plant Location	Year of Commission	Water Type	Capacity (L/h)	W/T Nominal Power (kW)	Unit Water Cost (\$/m <sup>3</sup> )
Ile de Planier, France	1983	SW/BW	500	4	-
Fuerteventura island, PUNTA JANDIA project	1995	SW	2,333	225	-
Therasia island, Greece	1997	SW	200	15	-
Pozo Izquierdo, Gran Canaria, AEROGEDESA project	2003	SW	800	15	4.4 -7.3
CREST, UK	2004	SW	500	2.5	2.6

Fuente: AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 174. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

En la tabla 7, se puede observar el costo del agua de acuerdo al sistema de desalinización, los procesos de MSF y MED poseen los precios más bajos, pero tienen altos consumo de energía, mientras que el sistema de ósmosis inversa tiene un costo de agua un poco más alto, pero tiene uno de los consumos de energía más bajo de todos los procesos.

**Tabla 7.** Costo de agua para los diferentes sistemas de desalinización

Technology	Feed water type	Specific energy consumption (kWh/m <sup>3</sup> )	Recovery ratio (%)	Water cost (US\$/m <sup>3</sup> )
MSF	Seawater, brackish water	81–144 (thermal)	0.6–6	1–5
MED	Seawater, brackish water	50–194 (thermal)	6–38	2–9
MD	Seawater, brackish water	100–600 (thermal)	3–5	13–18
RO	Seawater, brackish water	1.2–19 (electric)	10–51	3–27
ED	Brackish water	0.6–1 (electric)	25–50	3–16

Fuente: SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [OXFORD Academic]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 16. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>

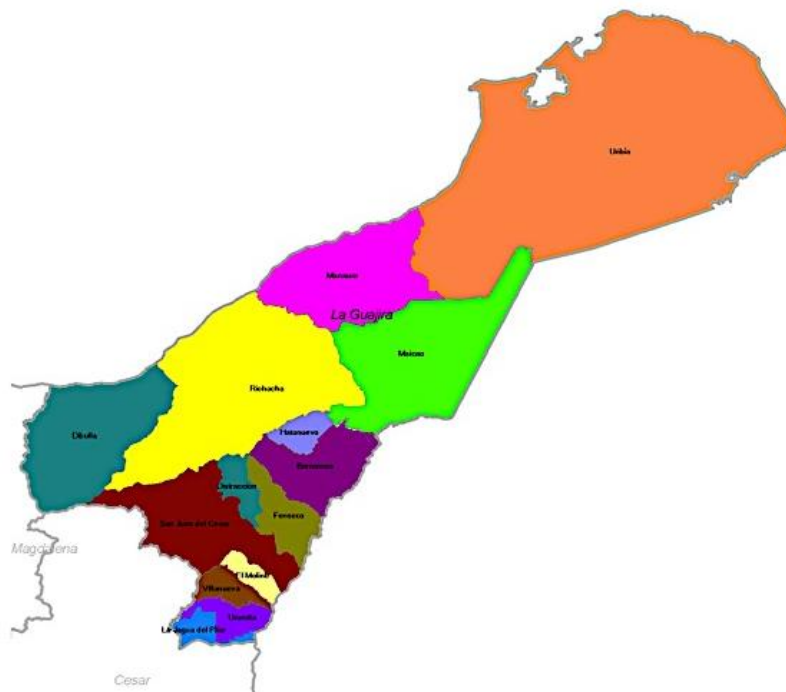
### 3. EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA PLANTA DESALINIZADORA EN LA GUAJIRA

#### 3.1 CONDICIONES GEOGRÁFICAS

De acuerdo a la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>97</sup>, “el Departamento de la Guajira está situado en el extremo norte de Colombia, su superficie de 20.848 km<sup>2</sup> representa el 1,8% del territorio nacional. La Guajira limita al norte con el mar Caribe, al sur con el departamento del Cesar, al este con el mar Caribe y Venezuela y al oeste con el departamento del Magdalena y mar Caribe”.

Como menciona la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>98</sup>, La Guajira se divide en 15 municipios como se observa en la figura 23 y 44 corregimientos, que a su vez se reparten en tres regiones: alta, media y baja Guajira.

**Mapa 2.** División administrativa de la Guajira



Fuente: GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA. División política y administrativas. [sitio web]. La Guajira.co. 16, mayo, 2013. Archivo en pdf. Disponible en <http://www.laguajira.gov.co/web/la-guajira/division-politica-administrativa.html>.

<sup>97</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE LA GUAJIRA. Informe socioeconómico: departamento de la Guajira. [sitio web]. Riohacha.co. enero, 2015. p. 9. Archivo en pdf. Disponible en <http://www.camaraguajira.org/publicaciones/informes/informe-socio-economico-la-guajira-2015.pdf>.

<sup>98</sup> *Ibíd.*, p. 9.



Según la Gobernación de La Guajira<sup>99</sup>, la Alta Guajira se caracteriza por ser semidesértica y de una muy reducida vegetación, luego está la Media Guajira que es menos árida con un relieve plano y ondulado y por ultimo esta la Baja Guajira de clima más húmedo y tierras productivas donde se encuentra la Sierra Nevada de Santa Marta.

### 3.2 CONDICIONES SOCIO - ECONÓMICAS

De acuerdo con la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>100</sup>, desde los 90 el departamento de la Guajira dada su ubicación recibe diferentes flujos migratorios, lo que ha producido un aumento en la población, los municipios de mayor concentración poblacional son Riohacha, Maicao, Manaure y Uribia.

Además la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>101</sup> indica que el departamento se caracteriza por las diferentes culturas indígenas, árabe, afrocolombiana y criolla, siendo un grupo de más de 500.000 personas; dentro de los grupos indígenas resaltan principalmente 5 grupos: wayuu, kinqui, ika, kogui o kaggaba y wiwa; los grupos indígenas wayuu o guajiros son aproximadamente del 38% de la población total del departamento de La Guajira.

También está la población de los criollos que según la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>102</sup>, son aproximadamente el 58% de la población total del departamento de la Guajira y son una mezcla entre los indígenas, blancos y negros, los cuales se ubican generalmente en los asentamientos urbanos.

La población afrocolombiana es aproximadamente el 6% o 15% según el DANE citado por la Cámara de Comercio de La Guajira<sup>103</sup> de la población total del departamento; por otro lado está la población árabe, que son comunidades euroasiática, provenientes generalmente del Líbano, Siria o Egipto, ubicadas principalmente en el municipio de Maicao.

Según la Gobernación de La Guajira<sup>104</sup> económicamente el departamento depende principalmente del comercio, explotación minera y turismo, en segundo

---

<sup>99</sup> GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA. División política y administrativas. [sitio web]. La Guajira.co. 16, mayo, 2013. Disponible en <http://www.laguajira.gov.co/web/la-guajira/division-politica-administrativa.html>.

<sup>100</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE LA GUAJIRA. Op. cit., p. 10.

<sup>101</sup> *Ibíd.*, p. 15.

<sup>102</sup> *Ibíd.*, p. 16.

<sup>103</sup> *Ibíd.*, p. 17.

<sup>104</sup> GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA.

plano se encuentra la agricultura y ganadería ya que solo se realiza de subsistencia; las actividades de comercio principalmente se realizan en los municipios de Riohacha y Maicao; además para las actividades de minería se cuenta con las minas del Cerrejón para carbón y las de Manaure para sal.

De acuerdo con Cámara de Comercio de La Guajira<sup>105</sup>, La Guajira logro obtener 5,685 millones de pesos de PIB en 2014, lo cual significa que tuvo un crecimiento del 2,6%, siendo menor al crecimiento nacional que fue de 4,6%; es importante saber que este departamento ha sido afectado por factores externos negativos como lo son las fallas en el servicio eléctrico y los problemas de la frontera con Venezuela.

### **3.3 TIEMPO Y CLIMA DE LA GUAJIRA**

De acuerdo con el IDEAM<sup>106</sup>, “la precipitación es el volumen de agua de lluvia que pasa a través de una superficie en determinado tiempo”, su unidad de medida es el milímetro (mm), es decir un milímetro de precipitación es equivalente a un litro de agua por metro cuadrado de superficie.

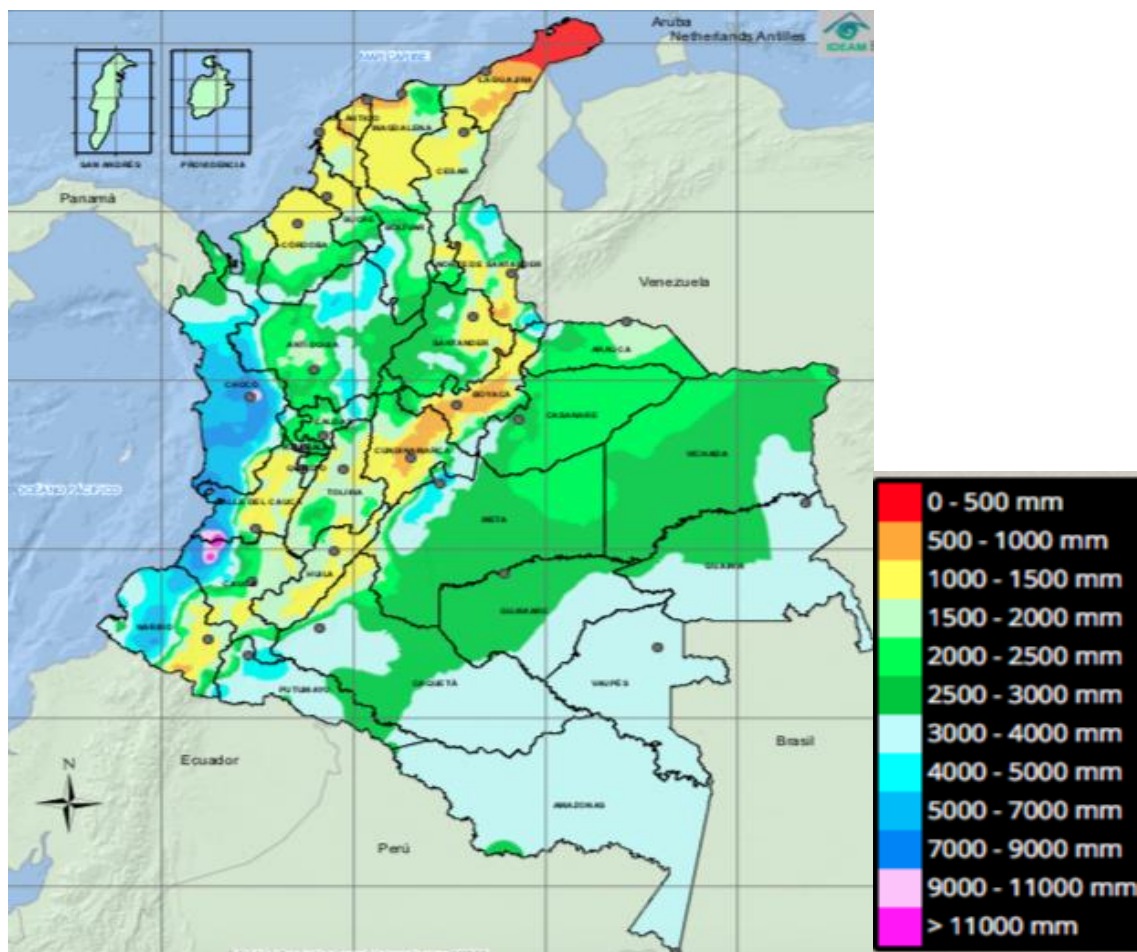
En el mapa 3, se observa que la región de la Guajira presenta los valores más bajos de todo el país en precipitación, la cual es responsable de depositar la mayor parte del agua dulce en el planeta; en la gráfica 3, se observa que los meses donde la precipitación es casi nula son enero, febrero y marzo, los de mayor precipitación son septiembre y octubre, pero aun así siguen siendo valores muy bajos, lo cual hace difícil el abastecimiento de agua dulce en la región.

---

<sup>105</sup> CÁMARA DE COMERCIO DE LA GUAJIRA. Op. cit., p. 8.

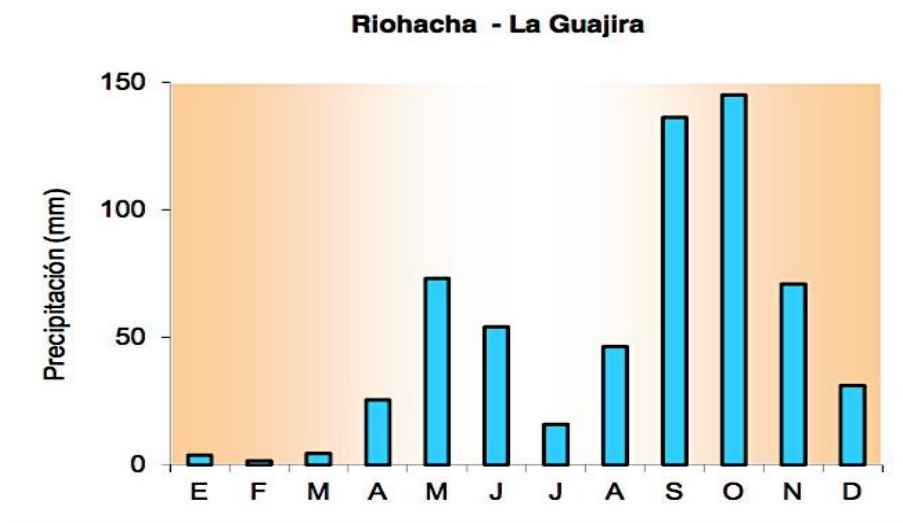
<sup>106</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Precipitación total media anual-mensual. [sitio web]. 2010. Archivo en pdf. Disponible en [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual\\_texto.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual_texto.pdf).

**Mapa 3.** Precipitación media total anual de Colombia



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Precipitación media total anual. Promedio multianual. [sitio web]. Atlas climatológico de Colombia. 2014. Disponible en [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Precipitacion\\_Anual.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Precipitacion_Anual.pdf).

**Gráfica 4.** Precipitación media total anual/ mensual de Colombia

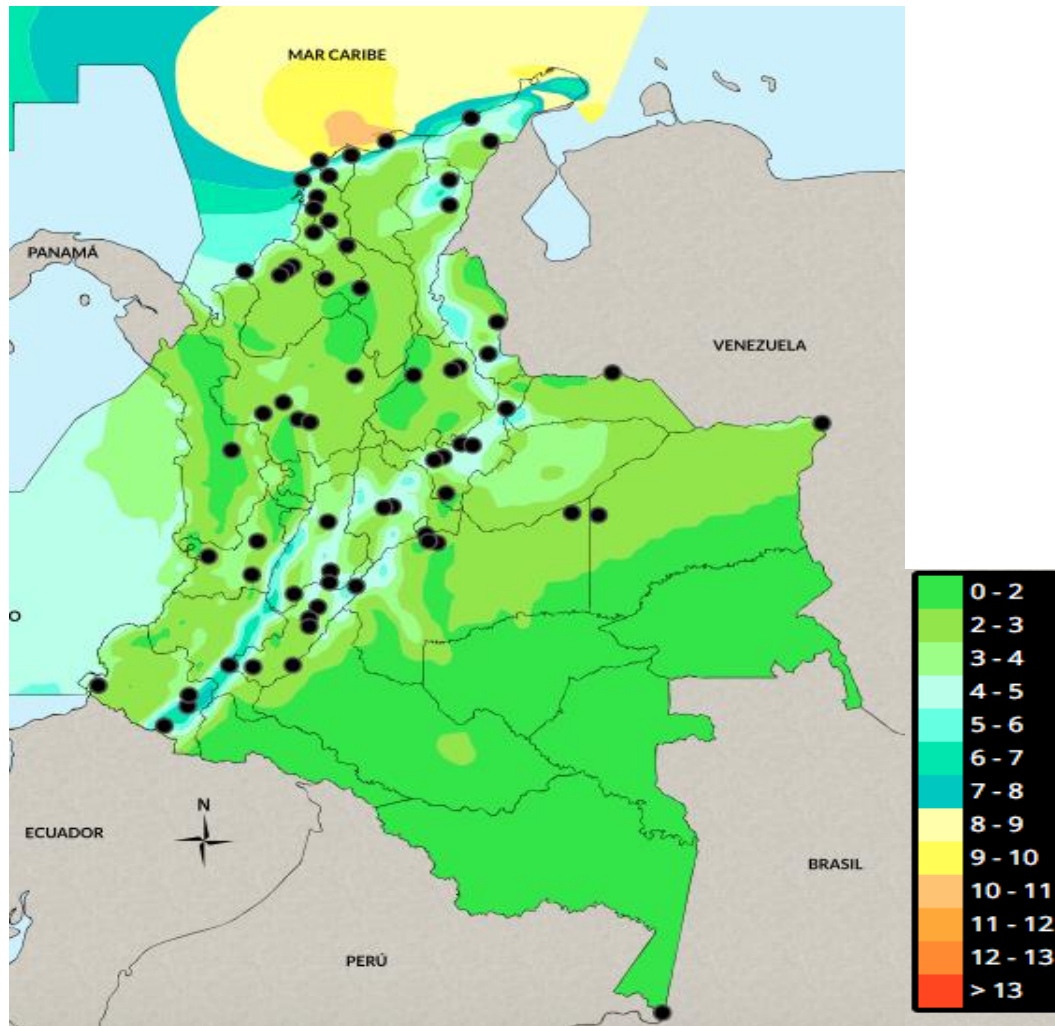


Fuente INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Precipitación media total anual: Gráficos. [sitio web]. 2010.p. 3. Archivo en pdf. Disponible en [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual\\_graficos.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual_graficos.pdf).

Para evaluar el potencial eólico de la región de la Guajira es importante la velocidad del viento que se puede evidenciar en el mapa 4, la Guajira bien al norte presenta velocidades entre 8 y 9 m/s, en el centro se presentan entre 4 y 7 m/s, estos valores se encuentran entre los valores más altos de Colombia, ya que los mayores se presentan en el mar Caribe; de acuerdo con Danish Wind Industry Association<sup>107</sup> estos valores son importantes, de acuerdo a ellos será la energía que los aerogeneradores podrán transformar en electricidad.

<sup>107</sup> DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. La potencia del viento: cubo de la velocidad del viento. [sitio web]. 6, mayo, 2003. Disponible en <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/enrspeed.htm>.

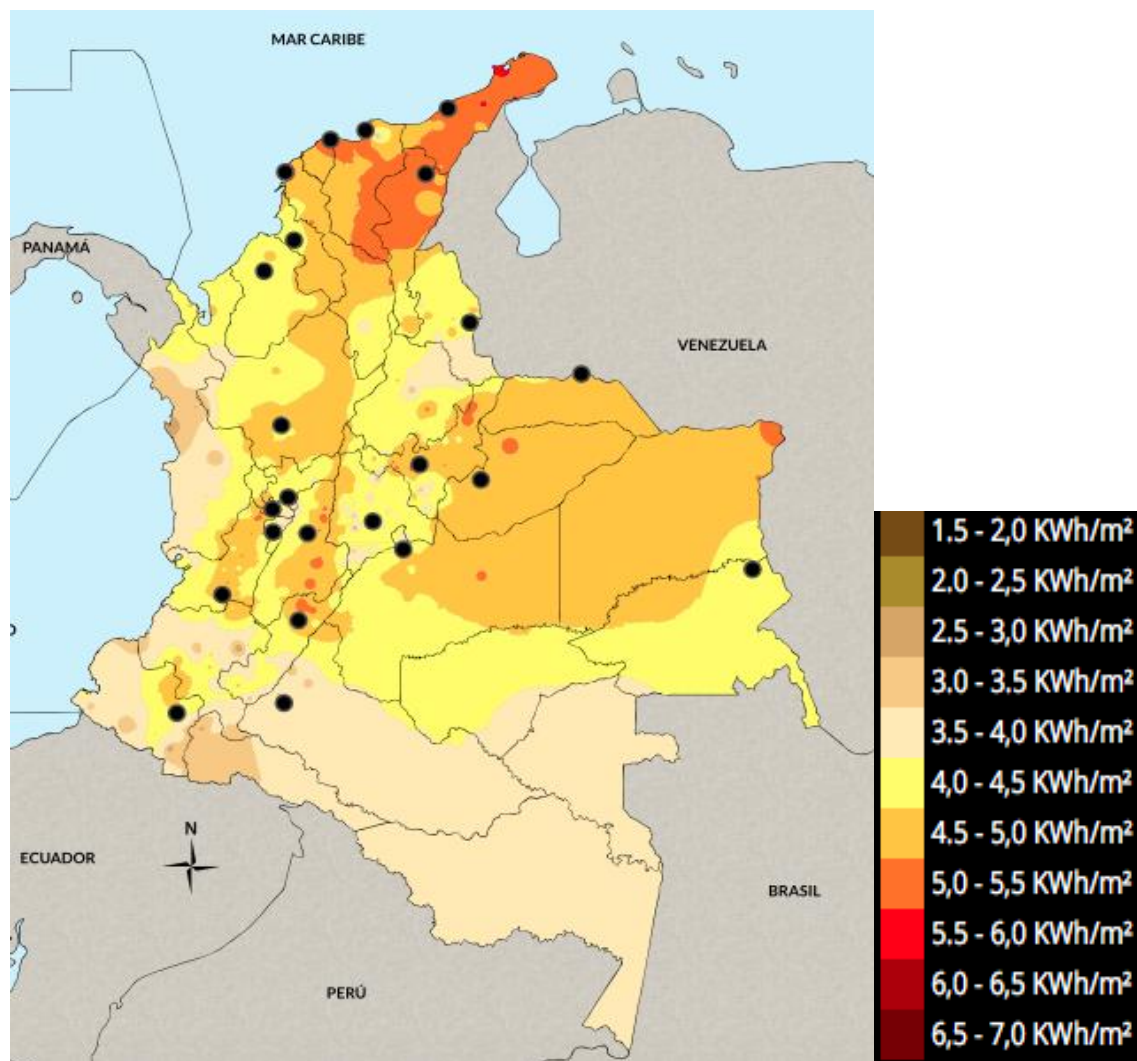
**Mapa 4.** Velocidad del viento a 10 metros de altura anual 2015 (m/s)



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura(m/s). [sitio web]. Atlas del viento de Colombia. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.

Para evaluar el potencial solar, el mapa 5 nos muestra que los valores de irradiación más altos se encuentran en la Guajira con valores entre 5 y 5,5 KWh/m<sup>2</sup>, esto es importante dado que no todas las superficies de la tierra reciben las mismas cantidades de irradiación solar.

**Mapa 5.** Irradiación global horizontal media diaria/anual de Colombia



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Irradiación global horizontal media diaria. [sitio web]. 2014. Atlas de radiación solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

### 3.4 RECURSO HÍDRICO

De acuerdo con el IDEAM<sup>108</sup> la oferta hídrica de Colombia es catalogada como una de las más grandes a nivel mundial, el rendimiento promedio hídrico es de 63 l/s-km<sup>2</sup>, valor que es seis veces mayor al rendimiento promedio del mundo (10 l/s-km<sup>2</sup>) y es tres veces el valor de rendimiento en Latinoamérica (21 l/s-km<sup>2</sup>).

<sup>108</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. Op. cit., p. 69.



Para el IDEAM<sup>111</sup>, en condiciones de clima seco, el rendimiento hídrico del país se reduce ampliamente, siendo de gran impacto en zonas como el Caribe, más específicamente en la Guajira, lo que la hace una zona sensibles especialmente en los meses de enero, febrero y marzo; además el IDEAM<sup>112</sup> agrega que se llega alcanzar reducciones del rendimiento hídrico en un 66%, as cuencas de los ríos Carraipia, Camarones, Ranchería, Tapias, San Juan, Mulatos y Bajo Sinú, llegan a presentar rendimientos menores a 10 l/s-km<sup>2</sup>.

En la región de la Guajira las energías renovables eólica y solar fotovoltaica son aplicables dadas las condiciones de tiempo y clima que se presentan en la región, pero de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, se recomienda la implementación de la energía solar fotovoltaica la cual puede transformar la luz solar directamente en electricidad, junto con el sistema de desalinización de osmosis inversa, con la cual se evitan los problemas de corrosión y se tiene un bajo consumo energético; además se puede acoplar al sistema solar fotovoltaico para la producción de agua potable.

---

<sup>111</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. Op. cit., p. 74.

<sup>112</sup> Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. Op. cit., p. 83.



#### 4. CONCLUSIONES

- Generalmente las plantas desalinizadoras se abastecen de combustibles fósiles para su funcionamiento, pero dado el impacto ambiental que generan, las energías renovables plantean una solución al problema de contaminación, aunque el costo de inversión es más alto, el de operación y energía es mucho más bajo, especialmente en áreas remotas donde el abastecimiento de combustible es difícil; en la región de la Guajira la implementación de energía solar fotovoltaica y eólica es favorable, gracias a las condiciones de clima y tiempo, pero se sugiere el uso de la energía solar fotovoltaica, dado que transforma la luz solar directamente en electricidad y su amplio desarrollo y accesibilidad en el país.
- Los sistemas desalinizadores son una alternativa que ha permitido el abastecimiento de agua potable a regiones desérticas sin buen acceso al recurso hídrico como lo es la Guajira colombiana, el proceso de ósmosis inversa es uno de los predominantes y más favorables, gracias a su bajo costo de adquisición, bajo consumo de energía y bajos niveles de corrosión se considera como una de las mejores opciones además de su favorable acoplamiento con la energía solar fotovoltaica.
- La implementación de una planta en la Guajira es viable ambientalmente ya que al utilizar energías renovables se evita la contaminación del medio ambiente por el uso de combustibles fósiles, socialmente las condiciones y calidad de vida de los habitantes se mejoran dado el limitado acceso que tienen al agua potable y económicamente los costos de inversión son relativamente altos respecto a la energía convencional, pero de operación y de la energía como tal, son bajos.

## **5. RECOMENDACIONES**

- Establecer la viabilidad técnico financiera de una planta desalinizadora en la Guajira, impulsada con energía renovable (solar o eólica) y con la tecnología de ósmosis inversa.
- Identificar y evaluar las desventajas de la salmuera residual del proceso desalinizador del agua de mar, al igual que su correcta disposición y posibles usos.

## BIBLIOGRAFÍA

AL-KARAGHOULI, Ali A. y KAZMERSKI, L.L. Renewable energy opportunities in water desalination. En: Desalination, trends and technologies. [google académico]. Golden, Colorado. 2011. p. 149 - 184. [Consultado 28, agosto, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en: <https://www.intechopen.com/download/pdf/13758>.

AL-SHARRAH, Ghanima; LABABIDI, Haitham y AL-ANZI, Bader. Environmental ranking of desalination plants: the case of the Arabian Gulf. En: Toxicological & environmental chemistry. [EBSCOhost]. 14, septiembre, 2017. vol. 99. 2017. p. 1054-1070. [Consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1080/02772248.2016.1249369>.

ALI, A., et al. Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. En: Renewable And Sustainable Energy Reviews. [ScienceDirect]. Enero, 2018. vol. 81. 2018. p. 1-21. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047>.

CÁMARA DE COMERCIO DE LA GUAJIRA. Informe socioeconómico: departamento de la Guajira. [sitio web]. Riohacha.co. enero, 2015. p. 9. Archivo en pdf. Disponible en <http://www.camaraguajira.org/publicaciones/informes/informe-socio-economico-la-guajira-2015.pdf>.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Ley 143 (1994). Por la cual se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética. Diario oficial no. 41434. 12, julio, 1994. Art 11. Cap II.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Ley 1715 (2014). Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. 2014. Cap I.

CORTÉS, Simón y ARANGO, Adriana. Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. En: Revista ciencias estratégicas. [EBSCOHost]. Medellín. 18, junio, 2017. vol. 25. no. 38. 2017. p. 375-390. ISSN 1794-8347. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/1513/151354939007.pdf>.

CURCIO, E, et al. Membrane technologies for seawater desalination and brackish water treatment. En: Advances in membrane technologies for water treatment. Mterials, processes and applications. Woodhead, 2015. p. 411-441. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-121-4.00013-7>.

DANISH WIND INDUSTRY ASSOCIATION. La potencia del viento: cubo de la velocidad del viento. [sitio web]. 6, mayo, 2003. Disponible en <http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/enrspeed.htm>.

DE LA CRUZ, Jhonatan; VALENCIA, Guillermo Y VANEGAS, Marley. Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia. En: Ingeniare. Revista chilena de ingeniería. Barranquilla. [SciELO]. Junio, 2018. vol. 26. 2018. p. 319-328. ISSN 0718-3305. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo pdf. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052018000200319>.

DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo y RUIZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. En: Tecnología y ciencias del agua. [EBSCOhost]. Agosto, 2013. vol. 4. no. 3. 2013. p. 27-46. ISSN 2007-2422. [consultado 4, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222013000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222013000300002).

GOBERNACIÓN DE LA GUAJIRA. División política y administrativas. [sitio web]. La Guajira.co. 16, mayo, 2013. Archivo en pdf. Disponible en <http://www.laguajira.gov.co/web/la-guajira/division-politica-administrativa.html>.

GÓMEZ, Tomás y RIBÓ, David. Assessing the obstacles to the participation of renewable energy sources in the electricity market of Colombia. En: Renewable and sustainable energy reviews. [Science Direct]. Valencia, España. Julio, 2018. vol. 90. 2018. p. 131-141. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.015>.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. Agua superficial: Caracterización y análisis de la oferta. [sitio web]. 2010. p. 53-110. Archivo en pdf. Disponible en <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021888/CAP3.pdf>

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Precipitación total media anual-mensual. [sitio web]. 2010. Archivo en pdf. Disponible en [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual\\_texto.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/LluviaAnualMensual_texto.pdf).

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Precipitación media total anual. Promedio multianual. [sitio web]. Atlas climatológico de Colombia. 2014. Disponible en [http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Precipitacion\\_Anual.pdf](http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Precipitacion_Anual.pdf).

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Velocidad promedio del viento a 10 metros de altura(m/s). [sitio web].

Atlas del viento de Colombia. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEAM. Irradiación global horizontal media diaria. [sitio web]. 2014. Atlas de radiación solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES MARINAS Y COSTERAS - INVEMAR. Colombia 50% Mar. [sitio web], Santa Marta.co. 2009. Disponible en: <http://www.invemar.org.co/web/guest/50-mar>.

INSTITUTO DE PLANIFICACIÓN Y PROMOCIÓN DE SOLUCIONES ENERGÉTICAS PARA LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS – IPSE. Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia. [sitio web]. Julio, 2014. p. 1-57. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>.

INTERAMERICAN NETWORK OF ACADEMIES OF SCIENCES - IANAS; Foro Consultivo Científico y Tecnológico, AC. Diagnóstico del agua en las Américas: Una visión al estado del recurso hídrico en Colombia. [sitio web]. México. 2012. p. 447. Archivo en pdf. Disponible en: [https://www.ianas.org/water/book/diagnostico\\_del\\_agua\\_en\\_las\\_americas.pdf](https://www.ianas.org/water/book/diagnostico_del_agua_en_las_americas.pdf).

JIMÉNEZ, Silvia, et al. Treatment of cleaning waters from seawater desalination reverse osmosis membranes for reutilization purposes. Part I: Application of Fenton process. En: Journal of water process engineering. [Science Direct]. Octubre, 2017. vol. 19. 2017. p. 248-252. ISSN 22147144. [consultado 4, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.005>.

MISSIMER, Thomas M. Hydrogeology, water quality, and microbial assessment of a coastal alluvial aquifer in western Saudi Arabia: potential use of coastal wadi aquifers for desalination water supplies. En: Hydrogeology journal. [EbscoHost]. 18, noviembre, 2014. vol. 22. 2014. p. 1921-1934. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1168-3>.

NOOROLLAHI, Younes; TAGHIPOOR, Salman y SAJADI, Behrang. Geothermal sea water desalination system (GSWDS) using abandoned oil/gas wells. En: Geothermics. [EBSCOhost]. Mayo 2017. Vol 67. 2017. p. 66 -75. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.008>.

SHATAT, Mahmoud y RIFFAT Saffa B. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. En: International Journal of Low Carbon Technologies. [EBSCOhost]. 1 Marzo 2014. Vol. 9. 2014. p. 1-19. ISSN 1748-1317. [Consultado 30, septiembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <https://doi.org/10.1093/ijlct/cts025>.

SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS - SUPERSERVICIOS. ZONAS NO INTERCONECTADAS – ZNI: Diagnóstico de la prestación del servicio de energía eléctrica. [sitio web]. Bogotá.co. Septiembre, 2017. p. 1-42. Archivo en pdf. Disponible en <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Sep/diagnosticozni-superservicios-oct-2017.pdf>.

VEZA, Jose M. Desalination in the Canary Islands: an update. En: Desalination. [Science Direct]. 1, abril, 2001. vol. 133. 2001. p. 259-270. ISSN 0011-9164. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00106-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00106-0).

VILLADA, Fernando; LÓPEZ, Jesús M. Y MUÑOZ, Nicolás. Effects of incentives for renewable energy in Colombia. En: Ingeniería y universidad. [EBSCOhost]. Julio, 2017. vol. 21. 2017. p. 94-108. ISSN 0123-2126. [Consultado 6, octubre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2118/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=3&sid=7e6f5523-8601-400a-88d8-03a524257000%40sdc-v-sessmgr06>.

ZÚÑIGA, Juan Francisco, et al. La energía nuclear para la desalinización del agua de mar. En: Nucleus. [EBSCOhost]. La Habana, Cuba. no 38. 2005. p. 9-14. ISSN 0864-084X. [consultado 3, noviembre, 2018]. Archivo en pdf. Disponible en <http://ezproxy.uamerica.edu.co:2109/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=10&sid=1f9e3d4a-3cc8-4bae-9b58-6015c367affe%40sessionmgr104>.