

**DESALINIZACIÓN DEL AGUA: ¿UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA  
POTABILIZACIÓN DEL AGUA?**

**ALEXANDER FAJARDO CADENA**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

**DESALINIZACIÓN DE AGUA: ¿UNA ALTERNATIVA SOSTENIBLE PARA LA  
POTABILIZACIÓN DEL AGUA?**

**ALEXANDER FAJARDO CADENA**

**Monografía para optar al título de Especialista en  
Gestión Ambiental**

**Orientador(a)  
Dora María Cañón Rodríguez  
Dra. en Sostenibilidad**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE EDUCACIÓN PERMANENTE Y AVANZADA  
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.  
2018**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Director de la Especialización

---

Firma del calificador

Bogotá D.C., Marzo de 2018

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García-Peña

Decano Facultad de Educación Permanente y Avanzada

Dr. Luis Fernando Romero Suárez

Director Especialización en Gestión Ambiental

Dr. Francisco Archer Narváez

Las directivas de la Fundación 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.

## **DEDICATORIA**

Esta Monografía la quiero dedicar principalmente a mis padres, Carlos Fajardo Y Marcela Cadena, quienes me han brindado su apoyo de todas las maneras existentes y juntos hemos logrado avanzar en mi desarrollo personal y como profesional.

Y a mi hermano Miguel Ángel Fajardo Cadena, que siempre es un ejemplo a seguir por la calidad de profesional que es.

## **AGRADECIMIENTOS**

De igual manera les agradezco a mis padres por los recursos que me han brindado. A las directivas de la Universidad de América que día a día hacen un esfuerzo conjunto para el mejoramiento continuo de sus procesos, a los profesores que me orientaron en este camino y por supuesto a mis compañeros de clase porque siempre fue un grupo excelente en donde se destacaron los valores de la amistad, el respeto y el compañerismo.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>18</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>20</b>
<b>2.1 DESALINIZACIÓN.</b>	<b>20</b>
2.1.1 ¿Qué es la Desalinización?.	21
2.1.2 Historia de la Desalinización.	23
2.1.3 Breve Descripción de las Tecnologías de Desalinización.	30
<b>2.2 AGUA SALADA</b>	<b>34</b>
2.2.1 Propiedades del agua de mar.	35
2.2.1.1 Salinidad.	35
2.2.1.2 Balance iónico.	38
2.2.1.3 pH.	40
2.2.1.4 Temperatura.	41
<b>2.3 AGUA DULCE Y AGUA POTABLE</b>	<b>42</b>
<b>3. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN</b>	<b>46</b>
<b>3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESALINIZACIÓN</b>	<b>46</b>
3.1.1 Según la especie extraída de la corriente de alimentación.	46
3.1.2 Según el tipo de proceso de separación adoptado.	48
3.1.3 Según el tipo de energía utilizado.	49
<b>3.2 TECNOLOGÍAS USADAS PARA LA DE DESALINIZACIÓN</b>	<b>50</b>
3.2.1 Pre y Pos tratamiento.	50
3.2.2 Destilación Multi-efecto (MED).	54
3.2.3 Destilación Multi-etapa (MSF).	57
3.2.4 Destilación por compresión de vapor (VCD).	60
3.2.5 Ósmosis inversa (OI).	62
3.2.6 Electrodiálisis (ED).	66
<b>3.3 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN</b>	<b>68</b>
<b>4. SITUACIÓN GLOBAL DE LA DESALINIZACIÓN</b>	<b>70</b>
<b>4.1 PAÍSES LÍDERES EN LA DESALINIZACIÓN</b>	<b>76</b>
<b>4.2 EMPRESAS LÍDERES EN LA DESALINIZACIÓN</b>	<b>83</b>
<b>4.3 DESALINIZACIÓN EN COLOMBIA</b>	<b>87</b>



<b>5. FACTORES LIMITANTES DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN</b>	<b>88</b>
<b>5.1 IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>88</b>
5.1.1 Impacto de las descargas al medio ambiente.	89
5.1.2 Impacto de las obras de toma en el ambiente marino.	92
5.1.3 Impacto causado durante la construcción de la planta.	93
5.1.4 Impacto por el creciente consumo energético.	94
5.1.5 Impacto en la calidad del aire.	94
5.1.6 Impacto sobre el crecimiento poblacional.	95
5.1.7 Otros impactos.	96
<b>5.2 ECONOMÍA</b>	<b>97</b>
5.2.1 Factores que afectan la economía de la desalinización.	99
5.2.2 Economía de la desalinización térmica.	100
5.2.3 Economía de la desalinización por membrana.	103
<b>5.3 SOSTENIBILIDAD</b>	<b>107</b>
<b>6. FUTURO DE LA DESALINIZACIÓN</b>	<b>110</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>115</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>116</b>

## LISTA DE CUADROS

	pág.
<b>Cuadro 1.</b> Clasificación del tipo de agua basada en el contenido de salinidad	38
<b>Cuadro 2.</b> Ventajas y desventajas de las principales tecnologías de desalinización	68
<b>Cuadro 3.</b> Principales impactos ambientales y acciones de mitigación del proceso de desalinización	97
<b>Cuadro 4.</b> Principales indicadores de diferentes procesos de desalinización	107

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
<b>Gráfica 1.</b> Porcentaje de origen del agua de alimentación en el proceso de desalinización a nivel mundial	23
<b>Gráfica 2.</b> Evolución de la capacidad mundial instalada acumulada	29
<b>Gráfica 3.</b> Capacidad de agua desalinizada instalada por tecnología	33
<b>Gráfica 4.</b> Salinidad de la superficie del océano medida desde el espacio por el programa 'Aquarius' de la NASA	37
<b>Gráfica 5.</b> pH superficial del agua marina en el año 2015	40
<b>Gráfica 6.</b> Temperatura superficial del océano	41
<b>Gráfica 7.</b> Distribución del agua dulce extraída. Consumo y generación de aguas residuales por sector.	44
<b>Gráfica 8.</b> Perfil global de la Desalinización	72
<b>Gráfica 9.</b> Evolución de la capacidad instalada acumulada de la desalinización por compresión de vapor	74
<b>Gráfica 10.</b> Incremento de la capacidad instalada contratada y disponible online (1980-2017)	75
<b>Gráfica 11.</b> Países con más plantas desaladoras en el 2007	76
<b>Gráfica 12.</b> Porcentaje de la capacidad de desalinización por región	77
<b>Gráfica 13.</b> Ubicación de las 10 plantas de desalinización con mayor capacidad de producción en el mundo	78
<b>Gráfica 14.</b> Evolución de la capacidad de producción acumulada de las plantas MED en los países del golfo pérsico	78
<b>Gráfica 15.</b> Evolución de la capacidad de producción acumulada de las plantas MSF en los países del golfo pérsico	80
<b>Gráfica 16.</b> Porcentaje de los diferentes costos anuales de las principales tecnologías de desalinización	106

## LISTA DE IMÁGENES

	pág.
<b>Imagen 1.</b> Esquema general de un proceso de desalación de agua de mar	22
<b>Imagen 2.</b> Clasificación de las tecnologías de desalinización basada en lo que se extrae de la corriente de alimentación	47
<b>Imagen 3.</b> Clasificación de las tecnologías de desalinización de acuerdo al tipo de proceso de separación adoptado.	49
<b>Imagen 4.</b> Clasificación de las tecnologías de desalinización basada en el tipo de energía utilizado	50
<b>Imagen 5.</b> Elementos de un evaporador de dos efectos	55
<b>Imagen 6.</b> Elementos de un sistema de destilación de múltiples efectos acoplado a un sistema de compresión de vapor térmica	57
<b>Imagen 7.</b> Elementos de una configuración común de desalinización de agua de mar MSF	58
<b>Imagen 8.</b> Elementos de un sistema de destilación por termo-compresión de vapor	61
<b>Imagen 9.</b> Diagrama general de un proceso de ósmosis natural y un proceso de ósmosis inversa	62
<b>Imagen 10.</b> Elementos de una instalación de ósmosis inversa con pretratamiento de ultrafiltración	63
<b>Imagen 11.</b> Configuración de una membrana en espiral	64
<b>Imagen 12.</b> Configuración de una membrana HFF	64
<b>Imagen 13.</b> Elementos de un modelo general del proceso de electrodiálisis	66
<b>Imagen 14.</b> Planta de desalinización de ósmosis inversa de Sorek, Israel	84
<b>Imagen 15.</b> Planta de Al Fujairah 2 en Emiratos Árabes Unidos	85

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los métodos de desalinización	32
<b>Tabla 2.</b> Salinidad en diferentes zonas del planeta según Forchhammer.	36
<b>Tabla 3.</b> Propiedades termodinámicas del agua de mar a una salinidad de 35.000 mg/L y a 20°C	37
<b>Tabla 4.</b> Porcentajes de los principales iones presentes en el agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Flemming	39
<b>Tabla 5.</b> Composición estándar para el agua de mar	39
<b>Tabla 6.</b> Temperaturas máximas y mínimas en las zonas costeras de los principales mares del mundo.	42
<b>Tabla 7.</b> Porcentajes de los principales iones presentes en el agua del río y el agua de mar	44
<b>Tabla 8.</b> Propiedades de las membranas comerciales utilizadas para osmosis inversa de agua de mar	65
<b>Tabla 9.</b> Plantas con mayor capacidad de desalinización en el mundo	77
<b>Tabla 10.</b> Instalaciones MED recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)	79
<b>Tabla 11.</b> Instalaciones MSF recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)	81
<b>Tabla 12.</b> Instalaciones MVC recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)	82
<b>Tabla 13.</b> Instalaciones OI recientes alrededor del mundo (Hasta 2012)	82
<b>Tabla 14.</b> Plantas de desalinización en Colombia	87
<b>Tabla 15.</b> Características de la corriente de salmuera de diferentes plantas en países del GCC	90
<b>Tabla 16.</b> Emisiones de CO <sub>2</sub> (Millones de m <sup>3</sup> ) de efecto invernadero de países del GCC	95
<b>Tabla 17.</b> Parámetros para la determinación del costo unitario del producto en los procesos de desalinización térmicos	101
<b>Tabla 18.</b> Costo unitario del agua desalinizada mediante procesos térmicos	102
<b>Tabla 19.</b> Costo de producción unitario estimado para los principales procesos de desalinización	103
<b>Tabla 20.</b> Costos de producción de agua en algunas plantas de desalinización (Hasta 2009)	104
<b>Tabla 21.</b> Costos de la desalinización en las plantas de ósmosis inversa	105
<b>Tabla 22.</b> Comparación de los costos de los principales procesos de desalinización de agua de mar	106

## RESUMEN

En este proyecto se realizó una investigación teórica acerca de las técnicas que se han desarrollado a nivel mundial para el aprovechamiento y consumo de agua proveniente de la desalinización del agua de mar o salobre, las ventajas y desventajas que tiene la aplicación de las tecnologías, y el futuro de este proceso cómo alternativa sostenible para la potabilización del agua. A lo largo de la historia, la purificación del recurso agua de mar ha presentado varios inconvenientes debido a los costos asociados a la infraestructura, consumo energético, consecuencias ambientales, limitaciones de salinidad para el consumo del ser humano e investigación para el mejoramiento del proceso.

Para comprender con mayor detalle cómo funciona el proceso de desalinización, se explicaron y describieron las tecnologías que actualmente se utilizan en los países líderes en la desalación de agua de mar (Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, España y Estados Unidos). De acuerdo a lo anterior, se identificaron dos grupos de técnicas, las que utilizan métodos térmicos y las que utilizan membranas. Se estableció que la viabilidad de la implementación de una u otra metodología dependerá de factores territoriales y económicos del país, tales como la ubicación geográfica, el poderío energético y recursos para investigación y desarrollo.

También se realizaron comparaciones entre las diferentes tecnologías con el objetivo de comprender cuál es la técnica que tenderá a desarrollarse más durante los próximos años. Adicionalmente, se mencionan y describen algunas alternativas cómo los procesos híbridos y el acoplamiento de fuentes de energía alternativas para destacar los estudios que se están realizando en la actualidad, y brindar

Con la información obtenida se estimó la viabilidad del proceso de desalinización en Colombia, y se analizó la situación mundial frente a la aplicación de estas tecnologías. Adicionalmente, se describieron los planes a corto y largo plazo en los países más desarrollados, el crecimiento esperado en América latina durante los próximos años, y la importancia de la desalación cómo alternativa sostenible para la potabilización del agua en un futuro no muy lejano. Finalmente, se realizó una reflexión acerca del papel que jugará la desalación en el siglo XXI.

**Palabras clave:** Desalinización, recursos hídricos, agua potable, aguas salinas y sostenibilidad.

## INTRODUCCIÓN

El agua dulce o agua potable es un recurso que con el pasar de los años se vuelve más escaso, y por lo tanto hace que el hombre sea más dependiente de su accesibilidad. Para el 2017 cerca de 700 millones de personas en el mundo no tenían acceso a agua consumible, y según la investigación de Martins<sup>1</sup>., para el 2025, se estima que dos tercios de la población mundial se verán afectados por la escasez de agua, y aproximadamente 1800 millones de personas vivirán en condiciones de una escasez crítica. Para dar solución a esta problemática es necesario estudiar alternativas no convencionales para la obtención de agua dulce, y se hace motivante la posibilidad de que la respuesta a tan grave situación se encuentre en los océanos.

El agua de mar es una disolución compuesta principalmente por agua, y se encuentra presente en los océanos y mares del planeta tierra. Su salinidad se debe a que contiene sales minerales disueltas a determinadas concentraciones. Según la UN WWAP<sup>2</sup> aproximadamente el 97,47% del agua total presente en el globo (aproximadamente 1400 trillones de litros) es salada, mientras que el 2,53% restante corresponde a agua dulce, de la cual dos terceras partes se encuentran inmovilizadas en glaciares y nieves perpetuas. De acuerdo a lo anterior, es posible notar la diferencia de proporciones entre el agua salada y el agua dulce, y es posible proponer que el papel del agua de mar frente a la grave escasez de agua será fundamental en los próximos años.

La desalinización es un proceso de separación de las sales minerales de una solución acuosa, que puede usar tanto tecnologías convencionales como no convencionales, dependiendo de las ventajas energéticas, económicas y tecnológicas del país que quiera poner en marcha la técnica. El proceso de eliminar las sales presentes en el agua de mar o aguas salobres, tiene como finalidad ser fuente de producción y suministro de agua potable, además de ser una alternativa para generar un incremento ilimitado del agua dulce disponible para el ser humano.

El agua es un recurso de fundamental importancia para el hombre y para el medio ambiente. El agua dulce disponible para el ser humano es insignificante con respecto al agua salada presente en el planeta tierra, por lo que es indispensable encontrar soluciones para aumentar la cantidad de agua apta para su consumo directo por parte las personas, o para ser utilizada en actividades agrícolas o industriales, y finalmente abastecer la demanda hídrica mundial.

---

<sup>1</sup> MARTINS, Alejandra. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua? [Sitio web]. Noticias. 22 de Marzo del 2017. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

<sup>2</sup> UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Water for People, Water for Life: Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2003. p. 8. ISBN 92-303881-5. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

La desalación se conoce hace mucho tiempo, pero los altos costos debidos al consumo energético elevado hacían que el proceso fuera inviable. Con la aparición de nuevas tecnologías se ha logrado que los precios de la desalinización tengan un comportamiento decreciente, mientras que la calidad del producto final (agua dulce) permite que el hombre pueda darle una gran diversidad de usos a este. Algunos países tienen la posibilidad de destinar recursos a la investigación en técnicas de eliminación de sales del agua de mar, y han podido determinar que existen varios grupos de métodos de desalación de acuerdo al tipo de energía que utilizan (térmica, mecánica, eléctrica o química), además, se debe resaltar la importancia de las membranas en algunas de estas metodologías.

En la actualidad, los métodos de eliminación de sales dependen en gran parte del poderío energético del país que lo desarrolla. Es por lo anterior que en la región del medio oriente, y algunas pocas excepciones, se utilizan las tecnologías térmicas, mientras que en las plantas de desalación instaladas en el resto del mundo existen preferencias por las tecnologías asociadas a las membranas. Lo dicho por Ruiz<sup>3</sup> data de los últimos años en donde las tecnologías de membrana le han quitado terreno a las termales, y se espera que estas últimas tengan un estancamiento en un futuro cercano para frenar el uso de combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental de la desalinización.

Este proyecto busca describir detalladamente las técnicas existentes de desalinización, haciendo énfasis en la disponibilidad y economía de las tecnologías en estudio, y el impacto ambiental que se pueda generar llevando a cabo el proceso. Finalmente se realizará una reflexión acerca de la desalación, su importancia como alternativa sostenible para la potabilización del agua y el papel que podría tener para cubrir la demanda de agua a nivel nacional y mundial.

---

<sup>3</sup> RUÍZ, Miguel. Situación Global De La Desalación. [Sitio web]. Madrid, ES. Blogs EOI Claustro. 26 de Febrero del 2014. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.eoi.es/blogs/miguelangelruizjimenez/2014/02/26/situacion-global-de-la-desalacion/>



## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Exponer los diferentes procesos de desalinización de agua y las diferentes tecnologías con las que se desarrollan.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Definir las tecnologías aplicadas, alcances, eficiencias y limitaciones.
- Identificar las experiencias a escala industrial, que están siendo aplicadas actualmente en el mundo.
- Establecer cuáles han sido las principales problemáticas que han llevado a la aplicación de las tecnologías en Qatar, Emiratos Árabes, Israel, etc.
- Analizar las ventajas y beneficios alcanzados con la aplicación de estas tecnologías.
- Realizar un análisis reflexivo sobre el futuro de estas tecnologías para el suministro de agua potable en el mundo.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es uno de los recursos naturales más importantes para la vida en el planeta, y es un bien fundamental en cualquier tipo de actividad necesaria para el desarrollo de los organismos vivos. La escasez de agua es un fenómeno que se ve influenciado no solo naturalmente, sino también por la acción del ser humano. En el globo hay suficiente agua potable para abastecer a las más de 7.000 millones de personas que lo habitamos en la actualidad, pero aparece un gran problema entorno al agua cuando se tienen en cuenta factores como su distribución geográfica irregular, el desperdicio, la contaminación y la gestión insostenible del valioso recurso.

La escasez del preciado líquido se convirtió en uno de los más importantes desafíos del siglo XXI, el cual ya están afrontando numerosas sociedades de todo el mundo. A lo largo del último siglo, el uso y consumo de agua creció a un ritmo dos veces superior al de la tasa de crecimiento de la población y, aunque no se puede hablar de escasez hídrica a nivel global, el número de regiones con niveles crónicos de ausencia de agua va en aumento.

La escasez de agua es un problema que ya se encuentra presente en todos los continentes. Alrededor de la quinta parte de la población mundial (aproximadamente 1.200 millones de personas) vive en zonas que presentan escasez física de agua, mientras que se estima que hay 500 millones de personas que se acercan a esta condición. Adicionalmente, la ONU<sup>4</sup> especifica que se debe tener en cuenta que la ausencia de infraestructura adecuada para el transporte del agua desde las fuentes hasta su consumidor es un inconveniente al que se enfrentan al menos otras 1.600 millones de personas

El agua dulce no es un bien ilimitado, pues, aunque el volumen de agua presente en la tierra no ha cambiado en los últimos 30 mil años, lo que si se ha deteriorado es la calidad del recurso, debido a la sobrepoblación y las actividades que esta conlleva. La renovación de las fuentes de agua dulce depende del proceso de evaporación y precipitación, sin embargo, Greenpeace Colombia<sup>5</sup> determinó tan solo el 20% de las precipitaciones terminan en la zona terrestre, disminuyendo notablemente la cantidad de agua vital y aprovechable para el ser humano, y esencial para el desarrollo social y económico de la sociedad.

El crecimiento demográfico, la industrialización, la urbanización y el aumento de la producción y el consumo han generado que la demanda de agua dulce sea cada

---

<sup>4</sup> ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. ONU. Decenio Internacional Para La Acción: El Agua Fuente De Vida. [Sitio web]. París, FR. Decenio del agua. 24 de Noviembre del 2014. [Consultado el 26 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

<sup>5</sup> GREENPEACE COLOMBIA. Contaminación: Agua. [Sitio web]. Bogotá, CO. Campañas. [Consultado el 26 de Febrero del 2018]. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>

vez mayor. Sin embargo, el problema se convertirá en una dificultad de gobernanza si no cambiamos radicalmente la forma en que manejamos, compartimos y usamos el agua. Adicionalmente, el cambio climático agravará los riesgos relacionados con variaciones en la distribución y disponibilidad de los recursos hídricos.

La población mundial se abastece, en gran medida, de aguas subterráneas. Esta fuente también se encuentra en grave peligro, pues se están sobreexplotando los acuíferos generando graves consecuencias como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada. Según estadísticas de la ONU<sup>6</sup> en el enfoque al agua superficial también se encuentra otro enemigo, la eutrofización, pues se espera que para el 2050 haya un incremento del 20% en el crecimiento de floraciones de algas nocivas.

Por lo anterior, es indispensable conocer nuevas tecnologías que permitan prolongar la utilización del recurso vital, además es necesario generar concientización respecto del uso y aprovechamiento del agua. En este planeta tenemos a nuestra disposición una inmensa cantidad de agua salada, la cual no es apta para el consumo humano, pero que seguramente, mediante algún tratamiento se puede convertir en una alternativa viable, entonces, ¿Cuáles son las tecnologías indicadas para hacer de este tipo de agua tan abundante un recurso consumible?, ¿En dónde se desarrollan estas técnicas?, ¿Cómo funcionan los métodos existentes?, ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del uso de estas técnicas?, ¿Quiénes son los más beneficiados con las nuevas tecnologías?, ¿Que nuevas tecnologías se están investigando?

Para KHAWAJI<sup>7</sup> es importante brindar soluciones a estos interrogantes e implementar las tecnologías que se han desarrollado durante los últimos tiempos, así seguramente se prolongará la productividad del recurso y se beneficiara de manera directa su consumo directo por parte del ser humano. Esta monografía busca dar respuesta a los interrogantes planteados a partir de la consulta de información en bases desarrolladas por otros autores con bases sólidas y estadísticas que permitan la sustentación de una manera clara y eficaz.

---

<sup>6</sup> UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Agua Para Un Mundo Sostenible: Datos y Cifras. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. Perugia, IT: Ediciones UNESCO, 2015. p. 1. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>7</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 47. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

## 2. MARCO TEÓRICO

El agua significa vida. A diario, los seres vivos realizan una notable diversidad de actividades que involucran directa o indirectamente el uso de agua, por lo general, en enormes cantidades. El agua es utilizada en actividades industriales, agrícolas y para fines domésticos.

Científicos de todo el mundo han realizado un esfuerzo importante para optimizar la gestión de los recursos hídricos convencionales con el objetivo de alcanzar una eficiencia óptima en la utilización del agua. A pesar de las mejoras desarrolladas al respecto, es evidente que las fuentes no convencionales de agua dulce son necesarias para satisfacer la tendencia actual y futura de la demanda de agua.

Los procesos de desalinización producen agua dulce mediante la separación de las sales del agua de mar o salobre. Existe la posibilidad de que el agua de mar, en abundancia, constituya una fuente sostenible confiable de agua potable, además de poseer un alto potencial para compensar la demanda de agua dulce en continuo aumento en el futuro<sup>8</sup>.

### 2.1 DESALINIZACIÓN.

Debido a las extensas regiones de los cinco continentes que presentan carencia de agua y al crecimiento incontrolado de su consumo por parte de las industrias, el ser humano ha tenido que ingeniar diferentes formas de obtener agua potable. La desalinización de aguas salobres o de mar es una de las vías a las que ha recurrido el hombre. De hecho, en las últimas décadas, las técnicas de producción de agua dulce a partir de agua de mar han evolucionado, hasta el punto en que en la actualidad existe un gran número de plantas de desalinización.

Los métodos de desalación, tanto de aguas salobres como de agua de mar, se pueden convertir, según las circunstancias, en una solución a la insuficiencia de agua dulce en algunas zonas. Con el pasar de los años, Delgado determinó como las tecnologías de desalinización han evolucionado, y principalmente aquellas que consumen menos energía y poseen una mayor eficacia, han permitido incrementar el rendimiento de las operaciones de desalación, al mismo tiempo que disminuyen los costos de producción, influyendo drásticamente en la consideración de que las aguas desalinizadas sean una alternativa viable.

---

<sup>8</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 1. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**2.1.1 ¿Qué es la Desalinización?** Según la Real Academia Española<sup>9</sup>, el término 'Desalinización' responde a "Quitar la sal del agua del mar o de las aguas salobres, para hacerlas potables o útiles para otros fines"<sup>10</sup>. Más detalladamente, la desalinización es un procedimiento que se le realiza a una disolución acuosa para separar las sales de la solución, o para separar el agua de las sales, esto dependerá del tipo de tecnología que se utilice. El objetivo del proceso es obtener agua potable o con un contenido total de sólidos disueltos (TDS) suficiente para ser utilizada en actividades industriales o domésticas.

La desalinización de agua de mar se basa en la separación del flujo de una solución acuosa con un determinado contenido de sales en dos flujos distintos; La primera corriente de salida corresponde al producto o permeado, y posee una concentración de sales mucho menor a la concentración de entrada, mientras que la segunda corriente es conocida como salmuera o concentrado, pues la concentración de sales es mayor a la del flujo de entrada.

Más específicamente, el proceso se basa en someter la disolución acuosa a un proceso de permeado o a un proceso térmico de desalinización, dependiendo del tipo de tecnología que se use; las corrientes obtenidas son, por un lado el agua lista para el uso industrial o consumo directo por parte del hombre (aunque puede que necesitar un pos-tratamiento), y por el otro, un producto que suele ser rechazado que es la salmuera. La salmuera es agua con un alto contenido en sales y por lo general se vierte al mar. El vertido del concentrado es causa de uno de los impactos ambientales más graves y sobre los que se tiene que tener mayor control en el proceso de la desalación, pues puede agredir drásticamente el ecosistema si no se dispone de forma adecuada, generando efectos desfavorables en la calidad del medio ambiente<sup>11</sup>.

Algunas de las técnicas de desalinización de aguas salobres son, tradicionalmente, las que implican ebullición y posterior condensación, las que han tenido mayor evolución en las últimas décadas, electrodiálisis u ósmosis inversa, y finalmente, tecnologías que se encuentran en desarrollo para hacerlas más económicas y viables, como la congelación y la evaporación por disminución de presión. El diseño y desarrollo de una u otra tecnología dependerá de varios factores, entre ellos, la accesibilidad o preferencia que se tiene hacia el uso de algún tipo de energía en un país o industria específica.

---

<sup>9</sup> AL-KARAGHOULI, Ali y KAZMERSKI, L. Renewable Energy Opportunities in Water Desalination. [Google Academic]. Desalination, Trends and Technologies. 1st ed. Rijeka, Croacia: InTech, 2011. p. 149. ISBN: 978-953-307-311-8. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>10</sup> REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. RAE. Definición De 'Desalinizar'. [Sitio web]. Madrid, ES. 20 de Diciembre del 2017. [Consultado el 02/282018]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=CPF8F80|CPFxS8m>

<sup>11</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 23. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

Para realizar esta operación se debe aportar energía al sistema, siendo las principales fuentes, la energía térmica, eléctrica o mecánica. En la Imagen 1. se muestran los componentes principales de un proceso de desalación según Cabero<sup>12</sup>.

**Imagen 1.** Esquema general de un proceso de desalación de agua de mar



**Fuente:** GARCÍA, J. Cabero. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía.

Los bienes hídricos susceptibles para ser utilizados como agua de alimentación en el proceso de desalación, por lo general son de dos orígenes: agua de mar o aguas salobres; estas últimas pueden ser superficiales, subterráneas o puede ser agua residual depurada, así mismo suelen proceder de acuíferos en contacto directo con el mar y de acuíferos aislados del mismo.

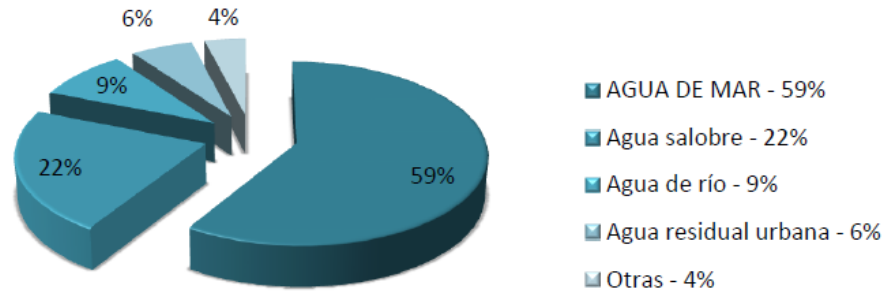
Es importante tener un amplio conocimiento de los acuíferos de los que serán aprovechadas las aguas salobres, así como mantener un correcto programa de bombeo, de lo contrario, beneficiarse de este recurso puede implicar problemas severos de deterioro de su calidad natural y del ecosistema en general. Las extracciones mal planificadas pueden dar lugar a problemas como el avance no controlado de la interfaz o el incremento de los procesos de disolución de formaciones salinas<sup>13</sup>. Un estudio realizado por Gleeson<sup>14</sup> publicado en la revista Nature Geoscience indica que el volumen total de las aguas subterráneas en los 2 km superiores de la corteza continental es de aproximadamente 22,6 millones de km<sup>3</sup>.

<sup>12</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 46. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>13</sup> DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 7. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>14</sup> GLEESON, Tom, *et al.* The global volume and distribution of modern groundwater. [Nature Geoscience]. Montreal, CA: Macmillan Publishers, 2015. Vol. 9, p. 161. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Gráfica 1.** Porcentaje de origen del agua de alimentación en el proceso de desalinización a nivel mundial



**Fuente:** CABRERO, J. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía.

De acuerdo a la Gráfica 1 es correcto afirmar que para el año 2015, al utilizar la desalación como alternativa para la obtención de agua potable, el agua de mar abarca el 59% de la producción, muy por encima de las demás posibles fuentes de alimentación para el proceso, como las aguas salobres al 22%, el agua de ríos al 9% y el agua residual al 6%<sup>15</sup>.

**2.1.2 Historia de la Desalinización.** El hombre siempre ha tenido la ambición de poder aprovechar sin limitaciones las inmensas reservas tanto de agua dulce, como de agua salada, del planeta tierra. Para lograr su cometido, ha tenido que afrontar el reto de separar las sales del agua, de hecho, el ser humano ha buscado vías para llevar a cabo esa purificación durante muchos milenios.

Desde la prehistoria se empezaron a delimitar los principios para la separación de las sales del agua de mar, debido a que el hombre podía observar el comportamiento cíclico del preciado líquido, centrándose en la evaporación del agua de los océanos por acción de la energía que irradia el sol, formando nubes que posteriormente causarían lluvia o precipitaciones, las cuáles contenían agua sin sales ni impurezas. Posteriormente, el ser humano intentó reemplazar la energía solar con fuego, surgiendo de este modo, el primer método de desalinización térmica.<sup>16</sup>

<sup>15</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 80. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>16</sup> DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 10. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

En la antigua Grecia se realizaron varios estudios para comprender y desarrollar bases sólidas del proceso de desalación. Entre el siglo IV a.C. y el siglo VII a.C. Tales de Mileto y Demócrito describieron un proceso de obtención de agua basado en la filtración del agua de mar a través de la tierra. Posteriormente, en el siglo IV, Aristóteles estudió más a fondo las propiedades del agua de mar y la posibilidad de llevar a cabo una desalación simple.

Más adelante, en el siglo I, Plinio plasmó en su gran enciclopedia, los primeros ensayos sobre métodos específicos para la desalación del agua. Un siglo después, dada la investigación de Montañó, Alejandro de Afrodiasias fue quien detalló por primera vez la destilación.<sup>17 18</sup>

Ya en la Edad Media, varios científicos se dedicaron a tratar, describir y desarrollar el proceso de la desalinización, pero tal vez el más destacado de la época fue el físico británico John Gaddesden, quien en su obra “Rosa medicine”, explica los fundamentos del proceso y sus ventajas.<sup>19</sup>

En la Edad Moderna, los estudios entorno al proceso de la desalinización se volvieron más extensos, concretos y habituales. La principal causa del entusiasta y acelerado interés de los científicos por la separación del agua de la sal, fueron los estudios geográficos, debido a que era necesario realizar viajes marítimos extensos a causa del comercio de la época, y se necesitaba abastecer de agua potable a las tripulaciones de las embarcaciones. En el siglo XVI, Andrés Laguna, médico personal del rey de España, redactó varios documentos en los que profundizaba sobre los métodos de desalinización. Todo lo anterior condujo a que en los buques se utilizaran alambiques, aparatos que tenían un mecanismo de destilación de líquidos que consistía en calentar el líquido a través de la evaporación, para posteriormente condensarlo mediante un enfriamiento.

En el año 1589, el alquimista e investigador italiano Giovanni Battista della Porta, desarrolló varios experimentos acerca de la desalinización, y en la segunda edición de su obra “Magia naturalis”, escribió un tomo completo sobre la obtención de agua dulce partiendo de agua de mar. Cabe resaltar que la primera patente acerca de la desalinización data del año 1675. Luego, en el año 1717, el médico francés Gauthier, considerado el padre de la desalación, presentó ante la academia de las ciencias una máquina para llevar a cabo el proceso, basándose en el alambique, mencionado en el párrafo anterior. Por último, en el siglo XVIII, la desalinización se vio favorecida, pues se adelantaron estudios acerca de las tecnologías térmicas

---

<sup>17</sup> *Ibíd.*, p.10.

<sup>18</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 31. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>19</sup> *Ibíd.*, p.32.



debido al auge de la industria del azúcar, ya que está necesitaba de evaporadores para disminuir los costos de sus procesos.<sup>20</sup>

Los métodos de desalinización cuyas bases se centran en energía térmica, cómo la destilación, congelación o evaporación solar, ya se conocían en los inicios del siglo XIX. En la segunda mitad del siglo XIX se presentaron avances importantes. En primer lugar, para el año 1872 el científico sueco Carlos Wilson elaboró en Chile la primera edificación de desalinización de naturaleza estable, la cual era una planta de destilación solar ubicada en una explotación minera en las salinas de Chile, con una producción de 22,5 m<sup>3</sup>/día y que abarcaba una superficie de 4.757 m<sup>2</sup>, y aunque no tenía un rendimiento muy alto, se convertía en la primera alternativa para abastecer de agua potable a la comunidad minera de esa zona. Posteriormente, bajo la investigación descrita por De la cruz<sup>21</sup> y con el objetivo de obtener agua potable para los barcos, en mayores cantidades, con menor esfuerzo y más rápidamente, en 1984, James Weir desarrolló una desalinizadora que consumía la energía residual de la caldera de las embarcaciones, pero empezaba a aparecer otro problema, los efectos del agua salada (corrosión, incrustaciones, etc.) sobre algunos materiales de construcción de los equipos.<sup>22</sup>

A comienzos del siglo XX, las técnicas de evaporación fueron las tecnologías dominantes en el momento, y los estudios se basaban en diseñar intercambiadores de calor más eficientes y de menor tamaño, para producir más agua utilizando menos energía<sup>23</sup>. En 1912, se construyó en Egipto la primera planta de desalación documentada, con un caudal de 75 m<sup>3</sup>/día. Media década después se instaló una planta en Stears, Kentucky (Estados Unidos) que producía 150 m<sup>3</sup>/día de agua consumible según el análisis de Montaña.<sup>24</sup>

Ya conocidas las técnicas térmicas del mundo de la desalinización, se empezaron a estudiar alternativas como las tecnologías de membrana, debido a que el elevado consumo energético hacía que el proceso se volviera costoso, e incluso de desarrollar en países con reservas energéticas escasas. En los años 30 se empezaron a estudiar propiedades de membranas para utilizarlas en la desalación,

---

<sup>20</sup> DE LA CRUZ, Carlos. La Desalinización de Agua de Mar Mediante el Empleo de Energías Renovables. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación alternativas, 2006. p. 66. [Consultado el 5 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>21</sup> *Ibid.*, p. 67.

<sup>22</sup> DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 11. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>23</sup> *Ibid.*, p. 67.

<sup>24</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 23. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

y en 1936 John Ferry, mediante una recopilación de investigaciones sobre el tema, realiza una clasificación de acuerdo a los materiales utilizados<sup>25</sup>. No obstante, fue hasta 1949 que se empezaron a emplearse membranas en la desalinización, gracias a estudios acerca de las resina elaboradas por Juda y Kressman. Bajo la investigación realizada por Benito<sup>26</sup> se debe tener en cuenta que durante la segunda guerra mundial se reconoció el potencial que podía tener la alternativa de la desalinización, pues las tropas militares necesitaban ser abastecidas de agua potable en zonas donde la escasez predominaba; luego del conflicto se inició la instalación de las primeras plantas desalinizadoras en países cercanos al mar pero con escasez de agua dulce como Kuwait y Arabia Saudí, esto según los estudios de Montaña<sup>27</sup>.

En la década de los 50, las instalaciones industriales de desalación eran de naturaleza térmica, y se destacaba la destilación súbita multi-etapa (MSF), dejando obsoletas las técnicas de tubos sumergidos. En 1954, en la Universidad de Florida, Reid y Breton llevaron a cabo investigaciones que arrojaron resultados aceptables para la separación de sales utilizando membranas, pues obtuvieron un rechazo cercano al 98% haciendo uso de membranas planas de acetato de celulosa. El año siguiente se empezaron realizar estudios que relacionaban la electrodiálisis con la desalinización. De la cruz<sup>28</sup> determino que en 1959 ocurrió un hecho que fue, posiblemente, el inicio de la era de la desalinización térmica, pues en aquel año la compañía Westinghouse instaló en Kuwait una planta con una capacidad de 2.273 m<sup>3</sup>/día, la más grande de la época.

Para 1960 ya habían 5 plantas desalinizadoras que producían alrededor de 5011 m<sup>3</sup>/día de agua potable. El desarrollo de la MSF incrementó rápidamente en cuanto a capacidad instalada, especialmente en los países de Oriente Medio, gracias a la disponibilidad y el costo del petróleo. En este mismo año, Loeb y Sourirajan crearon una membrana semipermeable de acetato de celulosa, y abrieron paso a las investigaciones del proceso de Ósmosis inversa. Un par de años después, la

---

<sup>25</sup> DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 11. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>26</sup> BENITO, Marcos, *et al.* Diseño de una Desaladora de Agua de Mar de 60.000 m<sup>3</sup>/día con Pretratamiento de Ultrafiltración. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación EOI, 2010. p. 12. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>27</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 33. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>28</sup> DE LA CRUZ, Carlos. La Desalinización de Agua de Mar Mediante el Empleo de Energías Renovables. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación alternativas, 2006. p. 66. [Consultado el 5 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

producción de agua desalada en el mundo mediante métodos térmicos incrementó aproximadamente a 8.000 m<sup>3</sup> como indico Felipe Correa.<sup>29</sup>

En 1970, el petróleo llegó a tener un costo de 3 USD/barril, razón por la cual los países exportadores de petróleo se dedicaron a instalar una gran cantidad de plantas evaporadoras. Es muy importante resaltar que los países con mayor poder energético derivado del petróleo, también eran algunos de los países con mayor escasez de agua dulce en el mundo<sup>30</sup>. La destilación súbita multi-etapa evolucionó y se empezaron a desarrollar los procesos de la destilación multi-efecto (MED) y compresión de vapor. En los años 70, se empezaron a comercializar las membranas de procesos como la electrodiálisis y la ósmosis inversa, provocando un aumento significativo y exponencial del uso de la desalación como alternativa de obtención de agua potable. La capacidad instalada en el planeta para el año 1970 había aumentado hasta 1'700.000 m<sup>3</sup>/día aproximadamente, gracias a que la instalación de las plantas era económica, aunque el consumo energético era muy alto bajo las condiciones explicadas por Benito y Delgado.<sup>31 32</sup>

En 1972 se desarrolló una membrana para agua de mar que podía obtener una separación del 99%; se modificó el material de composición, cambiando el acetato de celulosa por poliamida aromática. La implementación de esta membrana en procesos de desalinización mediante electrodiálisis y ósmosis inversa provocó un incremento muy importante en el número de plantas, además, el proceso se hizo más accesible para naciones que tenían pequeñas o escasas reservas de petróleo. La aceptación de estas tecnologías llevó a que año tras año se buscaran nuevos materiales que contribuyeran a mejorar las propiedades de las membranas, y hacer más sencillas las condiciones de operación del proceso.

Un año más tarde, en 1973, se presentaría la crisis del petróleo, una razón que llevaría a que los países ricos en esta fuente de energía, que a su vez eran las naciones con mayor escasez de agua, construyeran más plantas desalinizadoras para poder abastecer a las poblaciones que ya no podían acceder al agua potable debido a que los costos de adquisición y transporte del recurso se incrementarían demasiado con respecto a las pocas ganancias que estaba dejando el petróleo. Así

---

<sup>29</sup> CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 4. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>30</sup> *Ibid.*, p. 5.

<sup>31</sup> BENITO, Marcos, *et al.* Diseño de una Desaladora de Agua de Mar de 60.000 m<sup>3</sup>/día con Pretratamiento de Ultrafiltración. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación EOI, 2010. p. 12. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>32</sup> DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 11. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

mismo, empezaron a diseñarse nuevos intercambiadores de calor, con superficies de intercambio mayores para generar más destilado usando menos energía. Como lo pudo constatar Montaña<sup>33</sup>, también apareció el acoplamiento entre las plantas de producción eléctricas y las plantas de desalación.

En los años 80, la aparición de una nueva crisis de petróleo y de las membranas utilizadas en los procesos de ósmosis inversa, limitó el número de plantas de desalinización por métodos térmicos, y permitió que los demás métodos de desalación de aguas salobres se extendieran en países diferentes a los del Oriente Medio. Lo anterior impulsó el mejoramiento de los procesos de membrana, en especial el consumo energético, reduciendo los costos de inversión y de operación.<sup>34</sup>

En los 90's se mantuvo la supremacía de los métodos térmicos en los países de Oriente Medio, pero en el resto del mundo la ósmosis inversa obtuvo mayor aceptación. La industria árabe no quiso dejar de un lado los beneficios que traía la implementación de técnicas de membrana, pero tampoco querían dejar atrás su poderío en los métodos de destilación, por lo que decidieron adoptar procesos híbridos para reducir la demanda eléctrica y mejorar el rendimiento de los procesos de desalación. Por otro lado, a partir de 1990 aparecieron varios inversionistas privados que se apropiaron de gran parte de la industria de la desalinización, adquiriendo un gran número de contratos para diseñar, construir, operar y ostentar equipos según lo dicho por Correa<sup>35</sup> en la evaluación de sustentabilidad de las plantas desaladoras.

En el comienzo del nuevo milenio, se estimaba que la capacidad total instalada mundial era de aproximadamente 13.600 plantas, produciendo alrededor de 26'.000.000 m<sup>3</sup>/día, de los cuáles cerca de 14'000.000 m<sup>3</sup>/día correspondían a agua de mar y otros 12'000.000 m<sup>3</sup>/día se obtenían a partir de aguas salobres. La técnica de la ósmosis inversa cada vez tomaba más ventaja, y para el año 2003 el 47% de la capacidad instalada en todo el mundo utilizaba esta tecnología, mientras que otro 36% se mantenía en el uso de la MSF; el 17% restante corresponde a técnicas en estudio y que no han podido dominar el mercado por sus costos y/o disponibilidad. Si queremos ser más precisos y restringir las cifras solo al agua de mar, el 61% de las técnicas utilizadas son MSF y el 27% se refieren a la ósmosis inversa, lo que nos permite observar que las plantas antiguas con gran capacidad incrementan el porcentaje de la tecnología MSF. En el 2004 fueron instaladas 22 plantas de

---

<sup>33</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 33. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

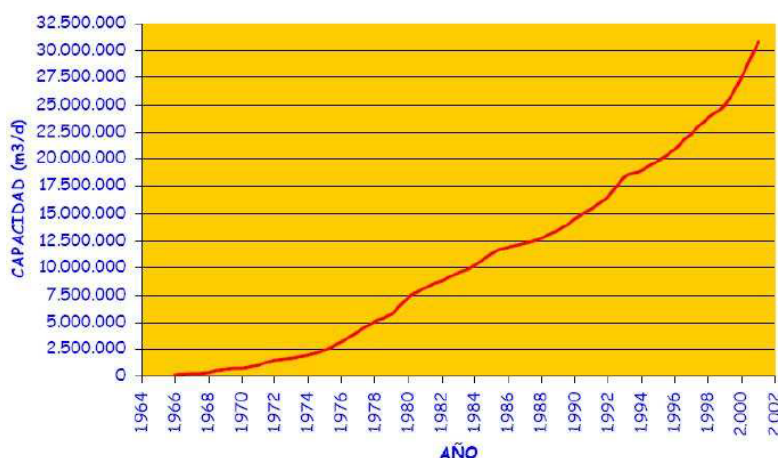
<sup>34</sup> *Ibíd.*, p. 33.

<sup>35</sup> CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 6. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

desalinización que aportaron una producción de 1'541.981 m<sup>3</sup>/día de agua potable a partir de agua de mar y 109.382 m<sup>3</sup>/día proveniente de aguas salobres.<sup>36</sup>

Los costos de la desalinización han disminuido notablemente gracias al apoyo y la notable incorporación de procesos de separación con membrana, en especial en aquellos países donde la energía es cara, logrando así sustituir los procesos térmicos. La técnica de la ósmosis inversa se ha convertido en la favorita a nivel mundial gracias a la reducción de los precios de las membranas y, paralelamente, el aumento de la calidad de las mismas. Adicionalmente, los costos energéticos, la modularidad y la escalabilidad, hacen de la ósmosis inversa un proceso más flexible que los procesos de destilación, pues permiten la construcción de plantas pequeñas o de tamaños monumentales.<sup>37</sup>

**Gráfica 2.** Evolución de la capacidad mundial instalada acumulada



**Fuente:** BENITO, Marcos, Diseño de una desaladora de agua de mar de 60.000 m<sup>3</sup>/día con pretratamiento de ultrafiltración.

En la Gráfica 2 se observa como las tecnologías de membrana la han tenido influencia (desde los años 80) en el crecimiento de la capacidad mundial instalada. Es por esto que para el año 2008, la CESPAAO (Comisión Económica y Social para Asia Occidental) bajo la investigación de Al-karaghoul, Ali y Kazmerski estimó que la capacidad instalada ya era de 61 millones de m<sup>3</sup> diarios.<sup>38</sup>

<sup>36</sup> CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 8. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>37</sup> DE LA CRUZ, Carlos. La Desalinización de Agua de Mar Mediante el Empleo de Energías Renovables. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación alternativas, 2006. p. 66. [Consultado el 5 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>38</sup> AL-KARAGHOULI, Ali y KAZMERSKI, L. Renewable Energy Opportunities in Water Desalination. [Google Academic]. Desalination, Trends and Technologies. 1st ed. Rijeka, Croacia: InTech, 2011. p. 149. ISBN: 978-953-307-311-8. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

Los países han dejado de utilizar sistemas térmicos y los han reemplazado por plantas con procesos de membrana, principalmente debido a los costos energéticos. La diferencia en cuanto a las cantidades de energía utilizadas son enormes, pero los países con costos por m<sup>3</sup> de agua más bajos son aquellos que utilizan las técnicas térmicas, motivo por el cual estas tecnologías no han desaparecido. Al utilizar la cogeneración, que es la obtención simultánea de energía eléctrica y energía térmica útil, los procesos térmicos se vuelven más eficientes económicamente hablando, siendo la accesibilidad a recursos energéticos, la verdadera limitación de esta alternativa.<sup>39</sup>

**2.1.3 Breve Descripción de las Tecnologías de Desalinización.** Durante el siglo XXI se han sumado más países a la larga lista de naciones con dificultades de escasez de agua, lo que implica buscar soluciones, entre las que se encuentran la obtención de agua dulce partiendo de fuentes poco tradicionales de agua, como el océano, implementando procesos de separación no convencionales.

Desde mediados del siglo XX ha existido evidencia de que la desalación de agua de mar es una alternativa confiable y sostenible desde el punto de vista económico, para el abastecimiento de agua potable. Como se mostró en la subsección 2.1.2. a lo largo de la historia han aparecido varias tecnologías, las cuales presentan ventajas y desventajas que las hacen más o menos oportunas en determinadas situaciones. Los continuos estudios y extensas investigaciones de Micale<sup>40</sup> han permitido complementar los procesos conocidos, de hecho, recientemente se han propuesto acoplamientos entre el uso de energías renovables y las instalaciones de desalinización para la producción de agua dulce a partir de agua de mar, disminuyendo el impacto ambiental causado por el abultado consumo energético.

Costar un proceso de desalación ha sido el factor que más ha restringido la expansión de las plantas desalinizadoras en muchos territorios. Si bien la implementación de las técnicas de desalinización ha crecido exponencial y considerablemente, existen países que tienen posibilidades de abastecimiento de agua más económicas, o en otras ocasiones existen limitantes económicos, sociales y ambientales. El progreso de la tecnología y el incremento del mercado de las fuentes no convencionales de obtención de agua potable han abierto un camino muy amplio para el uso y evolución de los métodos existentes según Correa.<sup>41</sup>

---

<sup>39</sup> MONTAÑO, Borja. Análisis Económico De La Desalinización. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 33. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>40</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 5. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>41</sup> CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 7. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

El tratamiento de aguas se refiere a un conjunto de operaciones unitarias físicas, químicas y biológicas cuyo objetivo principal es, mediante el uso de una diversidad de equipos, eliminar o reducir la cantidad de contaminantes del agua, y modificar características no deseables en ella, lo cual influirá en la combinación y complejidad de los sistemas, y dependerá directamente del origen y la finalidad de las aguas. Es decir, el propósito de estas operaciones es obtener agua con una calidad acorde al uso que se le va a dar. El consumo humano y animal, son las aplicaciones que requieren de una mayor calidad en el agua, por lo que los tratamientos de potabilización y depuración suelen integrarse en algunas ocasiones al grupo de operaciones del proceso de desalinización.

Una planta desaladora como Aguasistec<sup>42</sup> se encarga de recoger y procesar el agua de mar hasta convertirla en agua con las propiedades adecuadas para el consumo humano, uso industrial o uso agrícola. Las plantas suelen ser construcciones amplias y por lo general se sitúan cerca al mar para disminuir los costos energéticos asociados al bombeo del agua de entrada del proceso.

Principalmente, los procesos industriales de desalinización se basan en dos vías para la producción de agua a escala industrial: Los que necesitan calor o energía térmica (destilaciones o evaporaciones) para la separación, y los que hacen uso de membranas semipermeables que emplean energía eléctrica para retener las sales y purificar el agua que las penetra<sup>43</sup>. Los procesos de evaporación son utilizados mayoritariamente en la destilación de agua de mar, la ósmosis inversa se puede aplicar tanto en agua de mar como en aguas salobres, y la electrodiálisis solo se puede usar para desalar aguas salobres. Para 1998 las plantas térmicas generaban el 52% del agua desalinizada en el mundo, las plantas de ósmosis inversa el 42% y el 6% restante correspondía a las demás tecnologías, en especial la electrodiálisis bajo los principios investigados por Felipe<sup>44</sup>. Para idear el proceso de separación adecuado se debe partir del principio de que el agua y las sales no se separan espontáneamente, y necesitan una fuerza impulsora para llevarse a cabo (fuente de energía). Por ejemplo, en los procesos de separación térmica se utiliza como fuerza impulsora el calor proporcionado por procesos de combustión. En los procesos de membrana la fuerza impulsora puede ser la energía eléctrica proporcionada al sistema, las propiedades químicas de las membranas y los iones en disolución, etc.

---

<sup>42</sup> AGUASISTEC. Planta Desaladora o Planta De Tratamiento De Agua De Mar. [Sitio web]. Lima, PE. Productos de Tratamiento de Agua y Aguas Residuales. [Consultado el 6 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/planta-desaladora.php>

<sup>43</sup> DE LA CRUZ, Carlos. La Desalinización de Agua de Mar Mediante el Empleo de Energías Renovables. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación alternativas, 2006. p. 15. [Consultado el 5 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>44</sup> CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 8. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

La etapa crítica de un proceso de desalinización es aquella en la que se eliminan las sales del agua. Se debe seleccionar el método más adecuado teniendo como factores determinantes las características de la planta, la disponibilidad de energía, el caudal que se maneja, etc. Existen varias clasificaciones de las técnicas conocidas en la actualidad, por ejemplo, en la Tabla 1 se muestran clasificaciones según el tipo de separación, la energía utilizada, el proceso dominante y la técnica utilizada.

**Tabla 1.** Clasificación de los métodos de desalinización

SEPARACIÓN	ENERGÍA UTILIZADA	PROCESO	SISTEMA
Separación de agua de sales	Vapor	Evaporación	Destilación solar
			Destilación Súbita Simple
			Destilación Tubos Sumergidos
Separación de agua de sales	Frío	Cristalización	Destilación Súbita Multi-etapa
			Destilación Multi-efecto Tubos horizontales
			Destilación Multi-efecto Tubos verticales
Separación de agua de sales	Presión	Membrana	Compresión mecánica de vapor
			Compresión térmica de vapor
			Ósmosis inversa
Separación de sales de agua	Eléctrica	Membrana	Electrodiálisis
	Química	Resina	Osmionis
	Disolución	Disolvente	Intercambio iónico
			Extracción con disolventes

**Fuente:** BENITO. M, Diseño De Una Desaladora De Agua De Mar De 60.000 m<sup>3</sup>/día Con Pretratamiento De Ultrafiltración.

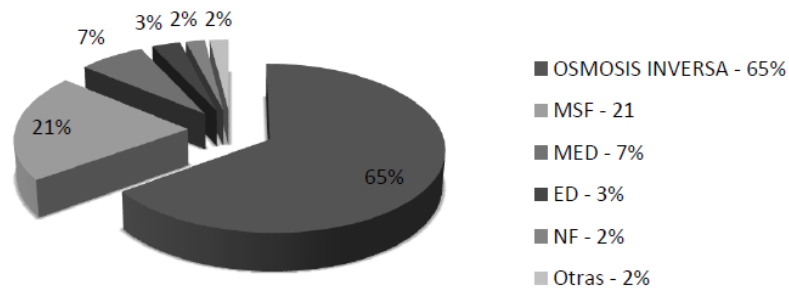
En la actualidad, algunos procesos mostrados en la Tabla 1 evidencian como la destilación de tubos sumergidos y la destilación multi-efecto con tubos verticales han dejado de ser fabricados. Hay que recordar que estos eran los procesos utilizados en los barcos cuando recién se estaban desarrollando los fundamentos de la desalinización. Por otra parte, para Benito<sup>45</sup> también aparecen procesos como la congelación que aún se encuentran en estudio y que no han alcanzado la fase de viabilidad tecnológica.

<sup>45</sup> BENITO, Marcos, *et al.* Diseño de una Desaladora de Agua de Mar de 60.000 m<sup>3</sup>/día con Pretratamiento de Ultrafiltración. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación EOI, 2010. p. 38. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.



A continuación, la Gráfica 3 muestra el dominio de la ósmosis inversa como alternativa para la producción de agua desalada frente a las demás técnicas de desalinización para el año 2015 con un 65%, le siguen las técnicas térmicas como la destilación multi-etapa con el 21%, la destilación multi-efecto con un 7%, la electrodiálisis con el 3%, y finalmente otras técnicas que aún se encuentran en desarrollo con un 4%<sup>46</sup>. Esta información no está limitada solo al agua de mar, también tiene en cuenta el agua desalinizada proveniente de aguas salobres, residuales, etc.

**Gráfica 3.** Capacidad de agua desalinizada instalada por tecnología



**Fuente:** CABRERO, J. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía.

También se pueden subdividir los métodos de desalinización de acuerdo al cambio de estado del agua, es decir, existen procesos en los que el agua se mantiene en fase líquida durante el tratamiento, pero también existen procesos en los que el agua se somete a un cambio de estado ya sea pasando por una fase sólida o por una gaseosa. A continuación se muestra la clasificación explicada anteriormente:

- Procesos que incluyen cambio de estado durante el procedimiento :
  - A través de una fase gaseosa:
    - ✓ Compresión de gases
    - ✓ Destilación multi-efecto (MED)
    - ✓ Destilación multi-etapa (MSF)
  - A través de una fase sólida:
    - ✓ Congelación

<sup>46</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 15. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

- Procesos que no incluyen cambio de estado durante el procedimiento:
  - Electrodiálisis
  - Ósmosis inversa

También es posible hacer una subdivisión para aquellas técnicas que aún no han podido adquirir importancia industrial debido a que no se han desarrollado lo suficiente. En este tipo de tecnologías encontramos:

- Desalinización solar:
  - Método directo: El destilado se produce en los colectores solares usando directamente la energía solar.
  - Método indirecto: Hay una unidad de desalación independiente del colector solar.
- Formación de hidratos: Su fundamento es la cristalización y consiste en agregar hidrocarburos al agua que se quiere desalar para finalmente obtener cristales de hidratos complejos. Su ventaja es la superioridad del rendimiento energético con respecto a los demás procesos, pero su complejidad radica en la difícil separación de los cristales y su posterior lavado.
- Intercambio iónico: Las resinas de intercambio iónico tienen la capacidad de intercambiar iones al ponerse en contacto con sales disueltas. Existen las resinas aniónicas que sustituyen aniones del agua por iones  $\text{OH}^-$ , y las catiónicas que reemplazan cationes por iones  $\text{H}^+$ . La principal desventaja del proceso es su alto costo de mantenimiento, pues las resinas se deben someter a regeneraciones periódicas con agentes químicos debido a que los iones presentes en la resina se agotan con el tiempo. Esto bajo los principios declarados por Cabrero<sup>47</sup> en su proceso de Ósmosis Inversa.

## 2.2 AGUA SALADA

El agua es el líquido más abundante en nuestro planeta; se estima que la tierra contiene aproximadamente  $1,4 \cdot 10^9 \text{ km}^3$  del líquido. La desalinización de agua de mar surge como alternativa de abastecimiento de agua potable debido a que aproximadamente el 97,5% del agua total del planeta se encuentra en los océanos, mientras que cerca del 0,5% es agua dulce a la que podemos acceder<sup>48</sup>. La cantidad total del agua en la tierra es constante debido al ciclo del agua, pues el agua de los océanos y las aguas superficiales se evaporan hacia la atmósfera y originan

---

<sup>47</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 53. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>48</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 2. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

precipitaciones. Para nuestro infortunio, la mayoría de esas precipitaciones terminan en el mar, por lo que los niveles de agua dulce decrecen mínimamente aunque sea prácticamente imposible notarlo. Para comprender como funcionan los métodos de desalinización es necesario conocer las propiedades del agua de mar.

**2.2.1 Propiedades del agua de mar.** El agua de mar es una solución que tiene una composición que varía de acuerdo a la zona y la época del año. Si deseamos saber cómo utilizar el agua salada para obtener agua dulce debemos conocer las propiedades del agua de mar, así posteriormente podremos entender como seleccionar una técnica adecuada para la separación de las sales. Para diseñar un sistema de desalinización de agua de mar, los dos factores de diseño más importantes son la salinidad y la temperatura. A continuación se describirán las principales propiedades del agua de mar.

**2.2.1.1 Salinidad.** Es una propiedad que permite medir los sólidos disueltos totales (SDT) en el agua de los océanos. Su valor varía notablemente de acuerdo a la región del planeta donde se mide, y es un factor de diseño fundamental para desarrollar un proceso de desalinización de agua de mar.

El término salinidad ha cambiado a lo largo de la historia de acuerdo a la ampliación del conocimiento sobre los mares y la evolución de los equipos de medición. En el siglo XVII, más detalladamente en el año 1674, el químico y físico inglés Robert Boyle se dedicó a medir y recopilar datos acerca de la composición y la forma cómo variaba la salinidad del agua de mar a través de su obra “Observations and Experiments about the Saltness of the Sea”; dichas mediciones las realizó haciendo uso de la evaporación.

Casi un siglo más tarde, en 1784, Antoine Lavoisier sustentó ante la Academia de Ciencias Francesas sus estudios y anunció públicamente la composición del agua.

En el siglo XIX se realizaron importantes aportes para conocer la composición del agua. Desde 1818 hasta 1822, el físico suizo Alexander Marcet se dedicó a estudiar la composición del mar. Logró determinar que la concentración de los principales iones presentes en la disolución se mantenía constante y que lo que cambiaba con respecto a la zona en donde se medía era la cantidad absoluta de sales. Este principio es conocido como el principio de Marcet o principio de las proporciones constantes y al usarlo se puede estimar la concentración de cualquiera de los elementos principales de la composición del agua de los océanos una vez se conoce alguno de ellos o la salinidad. En la segunda mitad del siglo, el físico danés Georg Forchhammer introdujo el concepto de la salinidad y logró identificar 27 elementos en el agua de mar. Así mismo, corroboró el principio de Marcet para los compuestos más abundantes como los cloruros, sulfatos, sodio, potasio, magnesio y calcio; también publicó sus conclusiones y resultados en 1865, donde dividía el planeta en

diferentes zonas y mostraba cómo variaba la salinidad para cada una de ellas cómo se puede apreciar en la Tabla 2 realizada por Cabrero.<sup>49</sup>

**Tabla 2.** Salinidad en diferentes zonas del planeta según Forchhammer.

REGIÓN	OCÉANO/MAR	SITUACIÓN	SALINIDAD (mg/L)		
			Media	Mínima	Máxima
1ª Región	Océano Atlántico	Entre el Ecuador y latitud 30° Norte	36.169	34.283	37.908
2ª Región	Océano Atlántico	Entre latitud 30°N y la línea que va entre el punto del norte de Escocia y el punto norte de la Isla de Terranova	35.946	33.854	36.927
3ª Región	Atlántico Norte	Entre la 2ª región y la línea que une Islandia con Labrador	35.391	34.831	36.480
4ª Región	Groenlandia	Mar de Groenlandia	35.278	-	-
5ª Región A	Bahía de Baffin	Norte de Canadá	33.281	32.304	34.414
5ª Región B	Mar de Noruega y Barents	Mar de Noruega y Mar de Barents	35.327	34.396	36.254
5ª Región C	Océano Ártico	Océano Ártico	33.623	-	-
6ª Región	Mar del Norte	Entre Noruega, Dinamarca y GBR	32.823	30.530	35.041
7ª Región	El Kattegat	Entre el mar Báltico y el mar del Norte	29.441	19.716	42.153
8ª Región	Mar Báltico	Mar Báltico	9.048	-	13.728
9ª Región	Mar Mediterráneo		37.936	36.301	39.257
10ª Región A	Mar Negro	Mar negro	15.894	11.880	18.146
10ª Región B	Mar Caspio	Datos de Forchhammer no son buenos	-	-	-
11ª Región	Océano Atlántico	Entre el Ecuador y latitud 30° Sur	36.553	35.930	37.155
12ª Región	Océano Atlántico	Entre la región 11 y la línea que une el cabo de Hornos y el cabo de Buenaesperanza	35.038	34.151	35.907
13ª Región	Océano Índico	Entre África y Malasia	33.868	25.879	35.802
14ª Región	Océano Pacífico Norte	Entre Filipinas, costa Sureste de Asia y las Islas Aleutianas	33.506	32.370	34.234
15ª Región	Océano Pacífico Central	Entre las islas Aleutianas y las Islas de la sociedad	35.219	34.157	36.061
16ª Región	Océano Pacífico Sur	Corriente de la Patagonia	33.966	33.788	34.152
17ª Región	Mar del Polo Sur		-	28.565	37.513

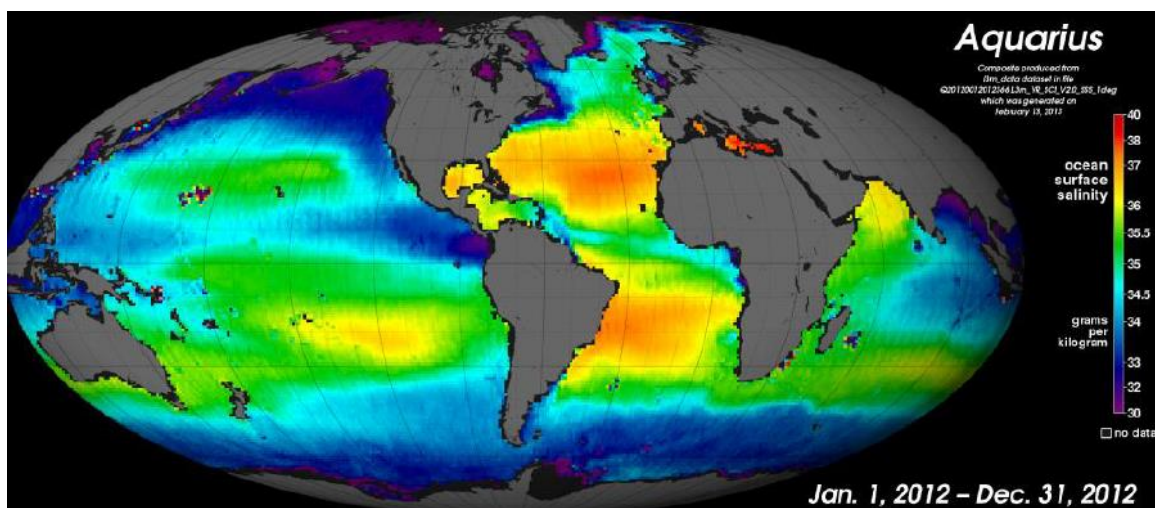
**Fuente:** FORCHHAMMER, G. On the composition of Sea-water in different parts of the ocean.

Para Cabrero<sup>50</sup> en el siglo XXI, la salinidad del agua de los océanos se ha empezado a monitorear por la NASA desde el espacio con el programa 'Aquarius', el cual posee potentes instrumentos de medición como un dispersómetro para corregir la variación del oleaje, un radiómetro de microondas, una cámara infrarroja de última generación y tres radiómetros sensibles a la salinidad (1,413 GHz; banda L).

<sup>49</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 31. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>50</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 35. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Gráfica 4.** Salinidad de la superficie del océano medida desde el espacio por el programa 'Aquarius' de la NASA



**Fuente:** CABRERO, J. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía.

La Gráfica 4 permite ver que la salinidad superficial de los mares y océanos de la tierra tiene valores entre los 30.000 y 40.000 mg/L, tal y cómo lo había descrito Forchhammer hace 150 años y cuyos resultados se observan en la Tabla 2.

**Tabla 3.** Propiedades termodinámicas del agua de mar a una salinidad de 35.000 mg/L y a 20°C

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1.024
Viscosidad (kg/m.s)	1,074*10 <sup>-3</sup>
Calor específico (kJ/kg.°C)	3,998
Presión osmótica (bar)	27
Elevación del punto de ebullición, a 20°C (°C)	0,32
Elevación del punto de ebullición, a 100°C (°C)	0,51

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. & RIZZUTI, L. Seawater Desalination. Conventional and renewable energy processes.

Generalmente, la salinidad de referencia es de 35.000 mg/L, a esta concentración se pueden conocer varias propiedades termodinámicas del agua de mar; algunas cómo la presión osmótica o el aumento ebulloscópico que para Micale<sup>51</sup> son fundamentales para el diseño y operación de los procesos de desalinización térmicos y con membranas.

<sup>51</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 4. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**Cuadro 1.** Clasificación del tipo de agua basada en el contenido de salinidad

<b>TIPO DE AGUA</b>	<b>SÓLIDOS DISUELTOS TOTALES (SDT) (ppm)</b>	<b>Anotación</b>
Agua dulce	Hasta 1.500	Composición química variable
Agua salobre	1500-10.000	Composición química variable
Agua salada	>10.000	Composición química variable
Agua de mar	10.000 – 45.000	Composición química constante
Agua de mar estándar	35.000	Composición química constante

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

En el Cuadro 1 se aprecia la clasificación de los diferentes tipos de agua de acuerdo al contenido de sólidos totales disueltos presentes en la disolución. Es así cómo se puede definir el tipo de agua que se tiene mediante la medición de su salinidad. También se resalta una característica ya mencionada, que es propia únicamente del agua de mar, su composición química constante.

**2.2.1.2 Balance iónico.** La salinidad es una propiedad química del agua de mar dada por la existencia de diferentes sales en disolución con el agua, entre las que se destacan los carbonatos, sulfatos y cloruros. Dichas sales se forman mediante la interacción química entre diferentes iones, cationes si poseen carga positiva y aniones si su carga es negativa. Los iones que se encuentran en mayor proporción en los océanos son el Cloro, Calcio, Sodio, Sulfato, Potasio y magnesio, y se les denomina iones conservativos debido a que su proporción es constante.

También existen elementos y compuestos que son no conservativos, pues sus proporciones varían gracias por el efecto de procesos físicos, químicos y biológicos. La mayor parte de las sustancias presentes en el agua de mar son no conservativas, pero su porcentaje con respecto a la totalidad de sales es muy pequeño.

En 1884 el analista químico alemán William Dittmar fijó el valor de los porcentajes de los iones principales del agua de mar. Posteriormente, en 1940, los valores tuvieron que ser corregidos por Lyman y Fleming, debido a que los cambios en algunos pesos atómicos afectaron las proporciones propuestas por Dittmar. A continuación, en la Tabla 4. se pueden observar los porcentajes de Dittmar y los porcentajes ajustados de Lyman y Fleming.

**Tabla 4.** Porcentajes de los principales iones presentes en el agua de mar según W. Dittmar y Lyman & Fleming

Ion	Nomenclatura	W. Dittmar (1884)	Lyman & Fleming (1940)
Potasio	K <sup>+</sup>	1,13%	1,10%
Sodio	Na <sup>+</sup>	30,66%	30,70%
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	3,65%	3,70%
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	1,17%	1,16%
Estroncio	Sr <sup>2+</sup>	-	0,04%
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,30%	0,41%
Cloruro	Cl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	50,02%	55,19%
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	7,71%	7,70%

**Fuente:** CABERO, J. Proceso de desalación de agua de mar mediante un sistema de ósmosis inversa de muy alta conversión en tres etapas con recirculación de permeado y doble sistema de recuperación de energía.

Es posible observar que los iones comunes con mayor presencia en el agua de mar son el cloruro (55,19%) y el sodio (30,70%), por lo que es normal que la sal más abundante sea el cloruro de sodio que abarca un 78% de las sales totales del agua y se forma gracias a la combinación de los dos iones mencionados. El sulfato y el magnesio también son iones considerablemente abundantes, aunque no en una proporción similar al cloruro. Se debe tener en cuenta que, aunque la salinidad varíe dependiendo de la región de estudio, las proporciones de los iones principales del agua se mantendrá constante.

**Tabla 5.** Composición estándar para el agua de mar

Ion	Nomenclatura	Concentración (ppm)	Porcentaje del contenido total de sales (%)
Cloruro	Cl <sub>2</sub> <sup>-</sup>	19.345	55
Sodio	Na <sup>+</sup>	10.752	30,6
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2.701	7,6
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	1.295	3,7
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	416	1,2
Potasio	K <sup>+</sup>	390	1,1
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	145	0,4
Bromuro	Br <sup>-</sup>	66	0,2
Borato	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	27	0,08
Estroncio	Sr <sup>2+</sup>	13	0,04
Fluoruro	F <sup>-</sup>	1	0,003

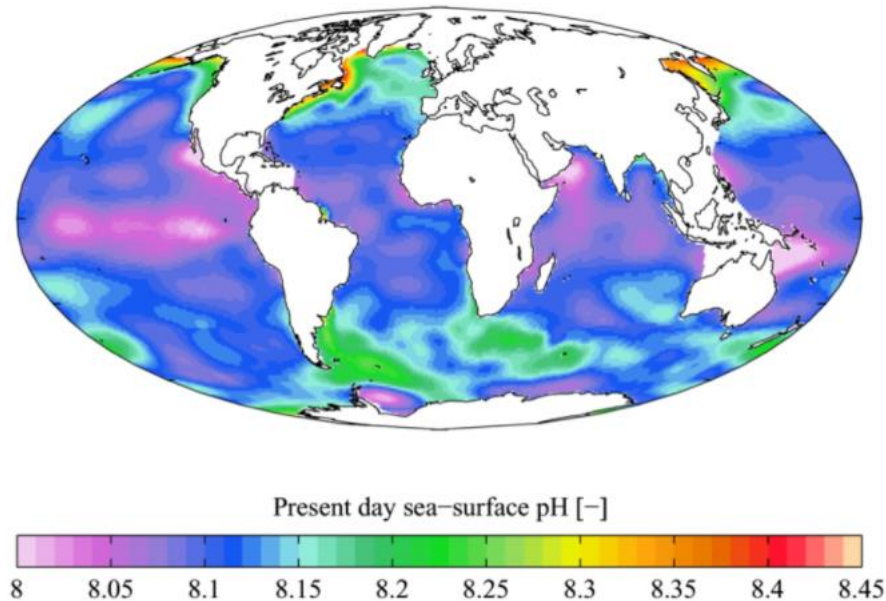
**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

En la Tabla 5 se puede observar la composición de referencia del agua de mar que se usa comúnmente para determinar la cantidad presente de algún ion en una determinada muestra, una vez se conoce la salinidad del agua o la cantidad existente de alguno de los iones.

**2.2.1.3 pH.** El pH es una forma de medir la tendencia al desequilibrio del agua de mar. El agua de mar posee un pH promedio de 8. Su valor puede variar dependiendo de la zona, pero no se aleja más de una unidad del valor típico gracias a la capacidad de equilibrio que poseen los océanos.

El mar se caracteriza por ser moderadamente alcalino, pues su pH suele tener valores entre 7,4 y 8,5 tal y cómo puede observarse en la Gráfica 5. Cuando el valor de esta propiedad se sale del rango mencionado se genera un desequilibrio, y de mantenerse se podrían alterar todas las condiciones de vida conocidas en el mar.

**Gráfica 5.** pH superficial del agua marina en el año 2015



**Fuente:** GIMÉNEZ, X. El Mar Es Básico. [Sitio web]. 3 del Marzo del 2015. [Consultado el 03/08/2018]. Disponible en: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/39/posts/el-mar-es-bsico-13433>.

Bajo los estudios realizados por Giménez<sup>52</sup> existen varios factores que mantienen el pH del océano en constante cambio, por ejemplo, la absorción de CO<sub>2</sub>, las emisiones de gases de la flora marina, los desechos de los animales y los desechos del ser humano. El equilibrio del pH del mar se da gracias a su absorción de una gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub>, del cual una fracción se transforma en ácido carbónico (HCO<sub>3</sub>), equilibrando las cargas respecto a la cantidad de sales presentes en el sistema.

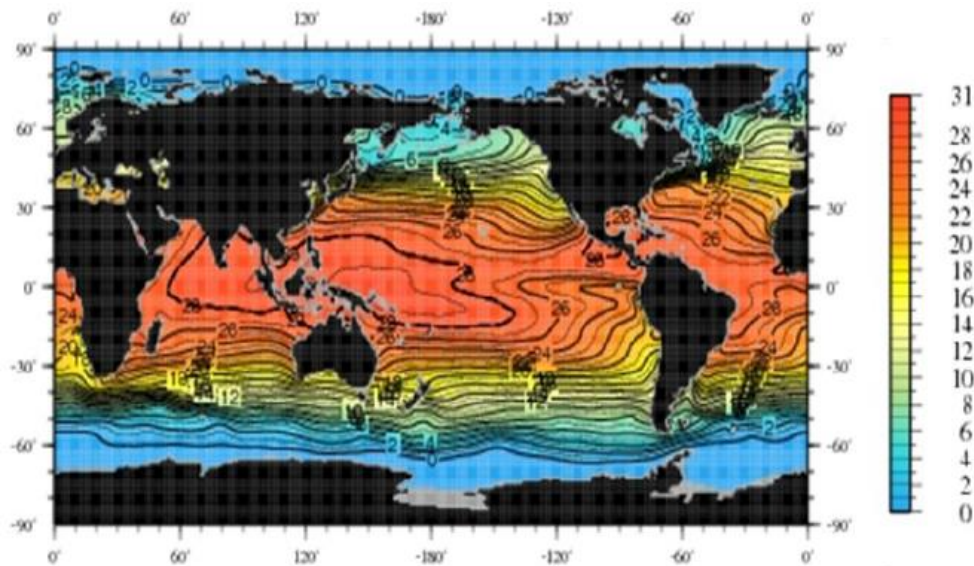
<sup>52</sup> GIMÉNEZ, Xavier. El Mar es Básico. [Sitio web]. Barcelona, ES. Química, aire y ambiente. 3 de Marzo del 2015. [Consultado el 8 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/39/posts/el-mar-es-bsico-13433>



El pH es una propiedad fundamental para los procesos de separación con membrana. La selectividad y el rechazo de sales puede cambiar de acuerdo al pH de la solución, así mismo, las membranas pueden perder varias de sus características de forma permanente.

**2.2.1.4 Temperatura.** La temperatura del agua marina es quizás, junto a la salinidad, la propiedad más importante y fundamental para diseñar un proceso de desalinización. Al igual que el pH y la salinidad, la temperatura varía en función de la zona de estudio, y adicionalmente, cambia de acuerdo a la época del año en la que se realiza la medición.

**Gráfica 6.** Temperatura superficial del océano



**Fuente:** National Oceanic and Atmospheric Administration. World Ocean Atlas 2013. [Sitio Web]. [Consultado el 03/082018]. Disponible en: <http://www.nodc.noaa.gov>.

La Gráfica 6 muestra el comportamiento térmico de los océanos. En los mares existen importantes diferencias de temperaturas entre las aguas de la profundidad y las que se encuentran sobre la superficie. Las aguas superficiales tienen una temperatura más alta gracias a la incidencia de los rayos solares sobre ellas, y tienen un comportamiento similar a los cambios térmicos que se presentan en los continentes, en otras palabras, la temperatura oceánica aumenta a medida que las aguas se acercan al Ecuador, lugar donde se producen las mayores temperaturas, mientras que a medida que se alejan del Ecuador las temperaturas decrecen, como es el caso de los mares polares, en donde se vuelve constante el carácter helado de sus aguas. El agua posee una temperatura relativamente estable (entre 1°C y

4°C) a profundidades superiores a los 1.500 metros, donde la oscuridad predomina, debido a que los rayos del sol no llegan hasta allí.<sup>53</sup>

Por lo general, cuando se va a llevar a cabo un proceso de desalinización de agua de mar, el agua de alimentación al proceso se toma de zonas costeras, o a pocos kilómetros de la costa, a profundidades que varían entre los 0 y los 25 metros. En seguida, en la Tabla 6 se observan las temperaturas mínimas y máximas de los principales mares, en zonas cercanas a la costa.

**Tabla 6.** Temperaturas máximas y mínimas en las zonas costeras de los principales mares del mundo.

ZONA	TEMPERATURA (°C)	
	Mínima	Máxima
Mar Mediterráneo	11	28
Mar del Norte	-1,6	17
Océano Atlántico Central	10	27,5
Océano Atlántico Sur	10	27,5
Mar de Arabia	20	30
Océano Índico	11	30
Mares de Australia	11	29
Océano Pacífico	10	29,8

Fuente: Autor.

Los datos de la Tabla 6 fueron extraídos de la base de datos del NOAA<sup>54</sup> (National Oceanic and Atmospheric Administration). Para su medición se hizo uso de estaciones de marea, una red de boyas y mediciones satelitales que se encargan de monitorear el comportamiento de los océanos, mares y lagos.

### 2.3 AGUA DULCE Y AGUA POTABLE

Es oportuno hacer una aclaración respecto a los conceptos de agua dulce y agua potable. Los estándares y normatividad que dicen cuando un agua es o no es dulce pueden cambiar de acuerdo al país; no obstante, existe un acuerdo común dictado por la OMS (Organización Mundial de la Salud) en la cual se define que la solución puede considerarse agua dulce cuando su contenido de SDT es menor a 500 ppm. La definición de agua potable es la misma desde el punto de vista químico, pero hay

<sup>53</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 40. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>54</sup> CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 41. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

que añadirle cualidades físicas cómo que sea incolora, insípida, inodora y que esté libre de bacterias contaminantes.

Para la Organización Mundial de la Salud OMS<sup>55</sup> el agua potable no debe ocasionar ningún riesgo importante a la salud del consumidor cuando este la ha ingerido durante toda su vida, considerando las diferentes vulnerabilidades que pueden llegar a presentar los seres humanos en cada una de las etapas de su vida. El agua potable es apta para todos los usos domésticos, incluyendo la higiene personal.

Existe una gran variedad de factores que han llevado a un desmesurado aumento del consumo mundial de agua dulce, entre los que se encuentran el aumento no controlado de la población y la mejora de la calidad de vida en muchos países, conllevando a un aumento en la demanda de agua dulce para cubrir una amplia gama de usos. Teniendo en cuenta lo anterior, se estima que en el 2040 la demanda mundial de agua dulce supere a la cantidad disponible, por lo que no se puede ignorar la situación, y se hace vital encontrar alternativas que nos permitan garantizar el cubrimiento total de la demanda de agua dulce.

Hace poco tiempo, se consideraba que el agua dulce era un recurso natural disponible, abundante, incluso, algunos sectores de la sociedad creían que era ilimitado, y que tan solo debía ser sometido a un tratamiento que mejorara levemente las características del agua para su finalidad mediante algunos procesos fisicoquímicos. Solo recientemente se ha considerado según Micale<sup>56</sup> que el agua dulce es un producto que puede fabricarse bajo ciertos estándares de calidad que dependerán del uso final. Una alternativa sostenible y no convencional podría ser la desalinización de agua de mar.

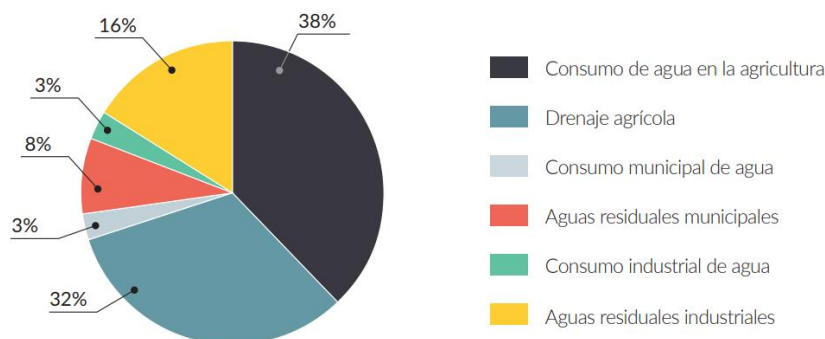
Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), la explotación de los recursos de agua dulce a nivel mundial son de 3.928 km<sup>3</sup>/año. Se estima que la agricultura es la actividad que más consume agua (1.716 km<sup>3</sup>/año) con un 44%.

---

<sup>55</sup> ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. OMS. Guías Para la Calidad del Agua Potable: Recomendaciones. [Biblioteca de la OMS]. 3ª ed. Ginebra, CH: Ediciones de la OMS, 2006. p. 11. ISBN: 92-4-154696-4. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>56</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 2. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**Gráfica 7.** Distribución del agua dulce extraída. Consumo y generación de aguas residuales por sector.



**Fuente:** UN World Water Assessment Programme. Aguas Residuales: El Recurso Desaprovechado.

La Gráfica 7 tomada de la UN WWAP<sup>57</sup> muestra los principales consumos que se le dan al agua dulce extraída, además se puede ver que las aguas residuales constituyen una porción del agua dulce que no puede ser utilizada a menos que se le realice un tratamiento.

En cuanto a las características químicas del agua dulce, esta puede llegar a tener una salinidad de hasta 1.000 ppm. La baja salinidad se debe por lo general a la vegetación y fauna de los ríos, el origen de los ríos y la abundancia de precipitaciones. La composición del agua dulce varía notablemente si se compara con la del agua de mar. Algunas veces la composición cambia debido a contaminante que pueden tener su origen en lluvias ácidas, o incluso en el polvo o la tierra arrastrados por fuertes vientos, además, los ríos son susceptibles a ser contaminados por el hombre, pues allí se disponen la mayoría de desechos líquidos domésticos e industriales, con o sin tratamiento. Tampoco hay que olvidar las fuentes de desechos no comunes como la minería ilegal y la extracción de petróleo, ya que está última, de no hacerse con la precisión suficiente, puede contaminar drásticamente las reservas de agua subterránea.

**Tabla 7.** Porcentajes de los principales iones presentes en el agua del río y el agua de mar

Ion	Nomenclatura	Porcentaje total del contenido de sales en agua del río (%)	Porcentaje total del contenido de sales en agua del mar (%)
Cloruro	Cl <sup>-</sup>	8,6	55,0
Sodio	Na <sup>+</sup>	6,9	30,6
Sulfato	SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	12,4	7,6
Magnesio	Mg <sup>2+</sup>	4,6	3,7
Calcio	Ca <sup>2+</sup>	16,6	1,2
Potasio	K <sup>+</sup>	2,6	1,1

<sup>57</sup> UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Aguas Residuales: El Recurso Desaprovechado. [Publicaciones de la UNESCO].1ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2017. p. 1. ISBN: 978-92-3-300058-2. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Tabla 7.** (Continuación)

<b>Ion</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Porcentaje total del contenido de sales en agua del río (%)</b>	<b>Porcentaje total del contenido de sales en agua del mar (%)</b>
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	31,9	0,4
Bromuro	Br <sup>-</sup>	-	,2
Borato	BO <sub>3</sub> <sup>3-</sup>	-	0,08
Estroncio	Sr <sup>2+</sup>	-	0,04
Fluoruro	F <sup>-</sup>	-	0,003
Sílice	SiO <sub>2</sub>	14,6	-
Hierro	Fe <sup>2+</sup>	0,7	-
Nitrato	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,1	-

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

En la Tabla 7 se observa que al comparar el agua de río con el agua de mar, la primera presente niveles de iones cloruro y sodio muchos menores, por debajo del 16% del total, mientras que el calcio y el bicarbonato representan aproximadamente la mitad de la cantidad total de iones presentes en el agua de río. También es importante subrayar la notable cantidad de sílice presente en los ríos, mientras que en el mar su concentración es insignificante<sup>58</sup>. Todo lo que se ha mencionado en este y en anterior párrafo, contribuye a que el pH del agua de los ríos sea ácido y se encuentre en un rango entre 5 y 6.

<sup>58</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 4. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

### 3. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN

Para llevar a cabo un proceso de desalinización es necesario elegir la técnica adecuada y que mejor se adapta a la situación que se presenta (localización, propiedades físicas y químicas del agua, recursos, etc.). Hasta el día de hoy, se han desarrollado diferentes procesos de desalinización, algunos de los cuáles se encuentran en estudio y evolución. Todas estas tecnologías operan gracias al aprovechamiento de energías convencionales o renovables, para finalmente producir agua dulce. En algunas ocasiones es necesario realizar un tratamiento complementario al agua, con el objetivo de adecuarla y potabilizarla lo suficiente teniendo en cuenta el uso que tendrá.

En el capítulo anterior ya se han mencionado la mayoría de las técnicas de desalinización, y se ha hecho énfasis en la existencia de dos grandes grupos: Tecnologías térmicas y tecnologías de membrana. A continuación, se mostrarán las clasificaciones más específicas de los procesos de desalinización, y se detallarán los principios, ventajas y limitaciones de cada una de las técnicas referidas.

#### 3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESALINIZACIÓN

En general, las tecnologías de desalación se pueden clasificar bajo tres criterios.

**3.1.1 Según la especie extraída de la corriente de alimentación.** Las tecnologías de un proceso de desalinización se pueden clasificar en dos grupos importantes. El primer grupo abarca las técnicas en las que se extrae el agua de la corriente de alimentación, generando un producto sin sales, mientras que en el segundo se encuentran los métodos que eliminan las sales de la corriente principal, la cual termina libre de sal.

El contenido de sales de agua de mar suele ser menor al 4%, por lo que parecería muy acertado seleccionar los procesos de extracción de sales, no obstante, las limitaciones tecnológicas no han permitido que estas técnicas alcancen los rendimientos de los procesos de extracción de agua, por lo tanto, estas últimas son preferibles. Particularmente, un diseño correcto de configuraciones altamente integradas de energía permitirá la producción de agua dulce, manteniendo un consumo energético relativamente bajo.

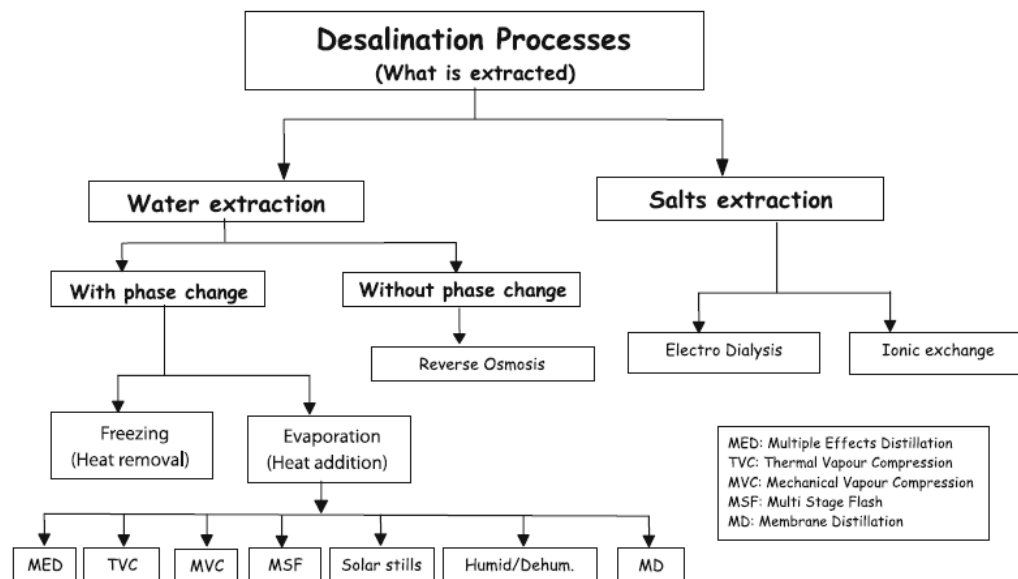
Algunos de los procesos del primer grupo logran la producción de agua dulce gracias a la separación del agua mediante un cambio de fase, generalmente en forma de vapor. Estos son los llamados procesos de evaporación o térmicos, y requieren altas dosis de energía para generar estas condiciones. Actualmente, existen dos procesos de desalinización por evaporación, que cubren gran parte de la capacidad instalada mundial, la desalinización multi-etapa (MSF) y la desalinización multi-efecto (MED).

La compresión térmica de vapor (TVC) y la compresión mecánica de vapor (MVC) son un par de sistemas de utilizados para aumentar el rendimiento de la desalinización, también partiendo de la vaporización. Existen otros dos procesos de uso menor, que también separan el agua removiendo vapor de la solución, son la humidificación/deshumidificación y la destilación con membranas.

También es posible lograr la separación mediante un cambio de fase, de líquida a sólida. Este proceso se llama congelación y consiste en retirar calor a la solución salina. Este proceso se mantiene en estudio debido a su inviabilidad económica.

Por otro lado, para Micale, Cipollina y Rizzuti<sup>59</sup>, existen los procesos que logran la extracción del agua de la corriente de alimentación sin necesidad de recurrir a cambios de fase, estos son los procesos de membrana. La ósmosis inversa es la técnica que más aceptación ha tenido en las últimas cuatro décadas. Esta última permite obtener agua dulce usando membranas semipermeables que permiten el paso del agua y obstruyen el recorrido de las sales hacia el permeado.

**Imagen 2.** Clasificación de las tecnologías de desalinización basada en lo que se extrae de la corriente de alimentación



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

Los procesos del segundo grupo son un poco más complejos y poseen ciertas limitaciones. Para extraer sales utilizan membrana o resinas de intercambio iónico. En la electrodiálisis, la selectividad de la membrana hace que los iones pasen a

<sup>59</sup> MICALÉ, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 6. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

través de ella, separando las sales de la corriente principal. En el proceso de intercambio iónico, los iones se alojan en la resina permitiendo la purificación del agua, sin embargo, los dos procesos son utilizados únicamente para aguas salobres, de lo contrario se obtendrá un rendimiento muy bajo. En la Imagen 2 se puede observar la clasificación descrita anteriormente.

**3.1.2 Según el tipo de proceso de separación adoptado.** Esta clasificación también posee varias subdivisiones. Inicialmente los procesos se separan de acuerdo a su naturaleza, es decir, por un lado encontramos los procesos térmicos y por otro lado los que hacen uso de membranas.

Los procesos de membrana son aquellos en donde la separación de las especies se realiza gracias a la presencia y acción de una membrana selectiva. En el primer caso se encuentran las membranas semipermeables, usadas en el proceso de ósmosis inversa, en donde la fuerza impulsora es la diferencia de presiones existente entre las dos caras de la misma membrana.

En un segundo caso, encontramos el proceso de la electrodiálisis, empleando membranas de intercambio iónico, que permiten el paso selectivo de los iones de acuerdo a su carga. La fuerza impulsora es un diferencial de potencial eléctrico existente entre los dos electrodos ubicados en cada extremo de la pila, la cual está conformada por varias membranas alternando cargas. Los aniones son forzados a moverse hacia el electrodo positivo, mientras que los cationes se dirigen hacia el electrodo negativo, penetrando las membranas y fluyendo hacia un compartimiento en donde se acumularan los iones, mientras que en otro compartimiento permanecerá una corriente con un contenido de sales mucho menor al del compartimiento concentrado.

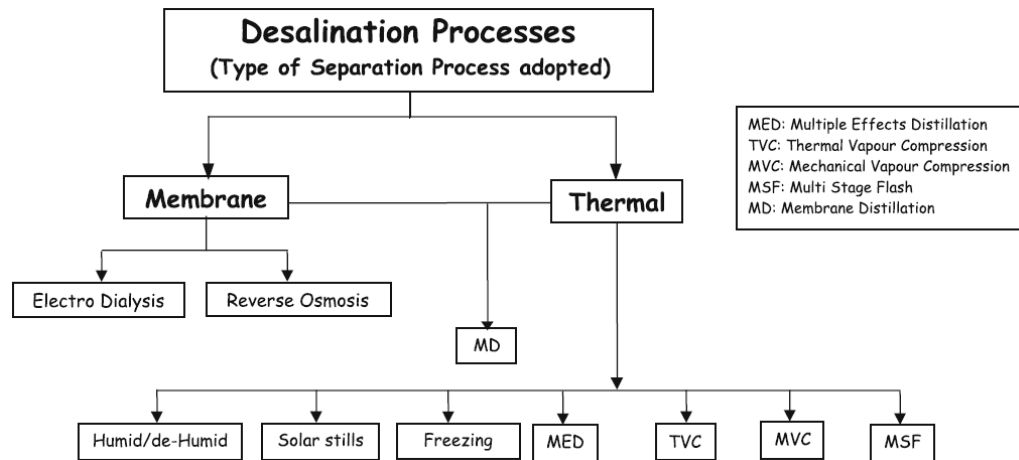
En cuanto al grupo de los procesos térmicos, está conformado por técnicas que necesitan de la adición o sustracción de calor para llevar a cabo la separación y así obtener agua dulce. Por lo general se utiliza la evaporación para generar agua pura en forma de vapor, a partir de agua salada. Posteriormente se condensa el vapor, y el calor de condensación se reutiliza en el precalentamiento de la corriente de alimentación o para la generación de más vapor.<sup>60</sup>

---

<sup>60</sup> MICALÈ, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 7. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.



**Imagen 3.** Clasificación de las tecnologías de desalinización de acuerdo al tipo de proceso de separación adoptado.



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

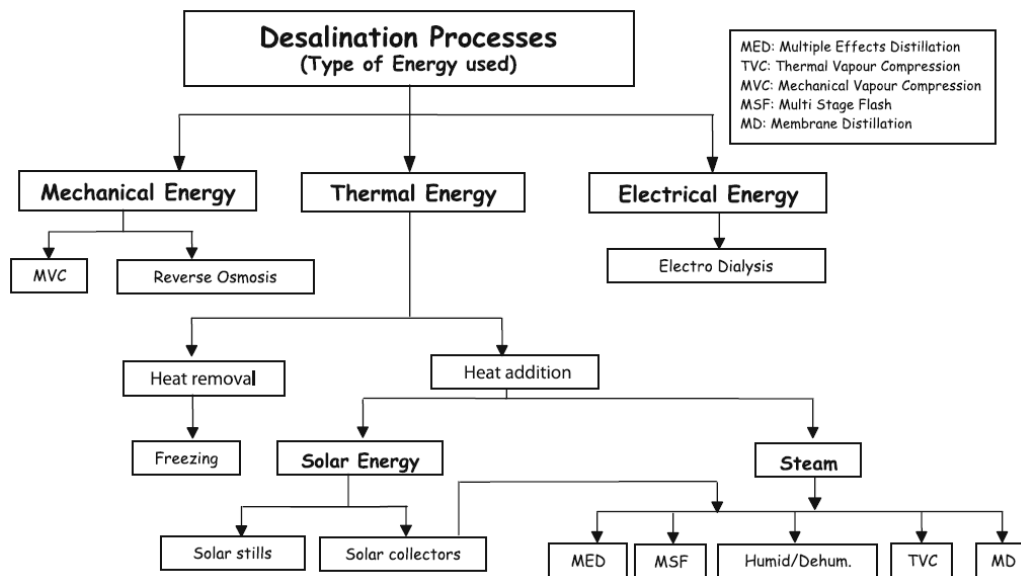
En la Imagen 3 es posible identificar los procesos de acuerdo a si utilizan energía térmica o funcionan con membrana. Existe un caso especial y se refiere a un proceso híbrido, se denomina destilación con membranas.

**3.1.3 Según el tipo de energía utilizado.** En tercer orden encontramos la clasificación en función del tipo de energía utilizada. Se pueden identificar la energía térmica, eléctrica y mecánica. En esta clasificación se hace la excepción de atribuir a los procesos de evaporación únicamente energía térmica, lo cual no es del todo verdadero, puesto que la mayoría de estas técnicas necesitan también energía eléctrica y mecánica para poner en uso las unidades auxiliares y los sistemas de bombeo.

Para Micalé<sup>61</sup> esta clasificación es de gran importancia cuando se están analizando posibilidades de acoplamiento entre las tecnologías de desalinización y algunas fuentes de energía alternativas, que por lo general son renovables. Un ejemplo válido es el estudio de la viabilidad del acoplamiento entre una técnica de desalación con paneles solares fotovoltaicos que le sirvan como fuente de alimentación de energía, haciendo la planta más autosustentable.

<sup>61</sup> MICALÉ, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 8. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**Imagen 4.** Clasificación de las tecnologías de desalinización basada en el tipo de energía utilizado



**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

En la Imagen 4 se puede ver claramente la posibilidad de acoplamiento entre las fuentes de energía solar y los procesos de desalinización de vaporización mediante el suministro de calor.

### 3.2 TECNOLOGÍAS USADAS PARA LA DE DESALINIZACIÓN

En seguida se describirán las principales tecnologías de desalinización con el objetivo de comprender cómo identificar cuál es la mejor alternativa según sea el caso. Se tendrán en cuenta las acciones de pre-tratamiento y pos-tratamiento, pues hacen parte del proceso y son fundamentales para obtener los resultados requeridos.

**3.2.1 Pre y Pos tratamiento.** Es conocido que para que el agua pueda ser ingerida por el ser humano debe cumplir determinados estándares de calidad que varían de acuerdo a la normatividad vigente y al país de consumo, incluso, también deben cumplir ciertos requerimientos para su uso en diferentes industrias con el fin de que el proceso sea confiable, y los equipos o productos finales no tengan alteraciones en su calidad. En algunas ocasiones, el producto obtenido mediante la tecnología utilizada no alcanza a satisfacer los requisitos, por lo que es necesario acoplar al sistema un pretratamiento del agua salada o un post-tratamiento para el agua dulce producida.

Frecuentemente el pretratamiento se lleva a cabo para asegurar el adecuado funcionamiento de todos los equipos y operaciones del proceso de desalinización, además, se encuentra estrictamente ligado al tipo de tecnología adoptado. Por lo general, los procesos de desalación térmicos demandan un bajo pretratamiento, pues se caracterizan por ser muy robustos si se comparan con los procesos de membrana. El pretratamiento común al que se somete la corriente de alimentación de agua de mar en las técnicas de Destilación Multi-etapa (MSF) y Destilación Multi-efecto (MED) consiste en:

- Filtración y sedimentación de sólidos en suspensión: Usando una rejilla de filtración se lleva la concentración de sólidos suspendidos en la corriente de entrada al proceso hasta un valor que sea apropiado para la operación.
- Desinfección: Busca inhibir el crecimiento de algas y bioincrustaciones, especialmente en las partes frías de la unidad, adicionando desinfectantes de uso común tales como hipoclorito, cloro, etc.
- Desaireación: Reduce la cantidad de CO<sub>2</sub>, bicarbonatos y carbonatos, para evitar la formación de incrustaciones. Adicionalmente, reduce los gases no condensables que pueden perjudicar las condiciones de vacío en la evaporación por etapas.
- Adición de químicos anti-incrustantes: Se trata de agregar productos químicos compuestos por ácidos orgánicos diméricos o poliméricos, o agentes quelantes, para evitar la formación de carbonato y sulfato de calcio.
- Adición de químicos antiespumantes: Mediante la adición de compuestos como poliglicoles, se reduce la formación de espuma en medio del proceso de evaporación.

Las incrustaciones son mucho más dañinas en los equipos de destilación multi-efecto que en los de destilación multi-etapa, principalmente por la complejidad que se presenta para limpiar la superficie externa caliente de los tubos. A pesar de ello, las unidades de MSF generalmente operan a temperaturas más altas, lo que implica que los tubos de los haces de condensación tengan un potencial de formación de incrustaciones más elevado. Lo anterior indica que la adición de compuestos químicos anti-incrustantes es esencial en los procesos térmicos. Los agentes antiespumantes suelen ser utilizados más frecuentemente en la desalinización mediante MSF debido a que el fenómeno de destello puede originar la formación de espuma, y a su vez incrementar el arrastre de gotas de sal al destilado, deteriorando la calidad del agua desalada.<sup>62</sup>

---

<sup>62</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 11. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

Los procesos de desalinización por membrana, en especial la ósmosis inversa, demandan pretratamientos más minuciosos, porque las membranas son mucho más susceptibles a fenómenos de ensuciamiento. A continuación se describen algunas operaciones de pretratamiento que se realizan con frecuencia a las unidades de desalación con membranas:

- **Desinfección:** Consiste en adicionar desinfectantes habituales como hipoclorito, cloro, etc., impedir la formación de algas y bioincrustaciones en los instrumentos más importantes de la unidad, por ejemplo en los filtros o las membranas. A causa de que una gran cantidad de membranas son muy sensibles a los oxidantes, también se hace necesario agregar un agente reductor que permita neutralizar el agente oxidante previo al ingreso de la corriente de alimentación al sistema.
- **Filtración:** En la actualidad se utilizan procesos de micro y ultrafiltración para reducir a menos de 3 el índice de ensuciamiento de las membranas (SDI), el cual estima el grado de ensuciamiento de las membranas causado por la contaminación en forma de partículas coloidales. Lo anterior permite que la vida útil de la membrana se prolongue, y que la frecuencia con la aparezcan problemas de mantenimiento y limpieza de membranas sea menor.
- **Adición de químicos anti-incrustantes:** Al igual que en los procesos térmicos, pretende reducir la formación de carbonato de calcio.

Los pretratamientos en las plantas de ósmosis inversa son tan importantes que pueden llegar a influir en los costos generales del agua hasta en un 40%. En algunas circunstancias el agua de mar tiene una calidad muy alta, con una baja turbidez y un índice de ensuciamiento de las membranas aceptable, por lo que los pretratamientos dejan de ser fundamentales en los procesos. No obstante, es conveniente realizarlos para garantizar el adecuado funcionamiento de la planta. Algunas veces el proceso de filtración es innecesario.<sup>63</sup>

Cuando se obtiene la corriente de salida de la técnica específica utilizada para la desalinización, se procede a verificar si las condiciones del agua obtenida son idóneas para el uso industrial, agrícola o doméstico. Es muy común que sea necesario realizar un post-tratamiento para alcanzar los estándares establecidos para una determinada finalidad del agua. La rigurosidad del tratamiento posterior dependerá directamente de la tecnología utilizada para obtener el agua desalada, y del uso final del producto.

En el caso de las plantas térmicas, el agua obtenida es casi destilada y posee un contenido de sales entre 10 y 20 ppm. El agua desalinizada térmica es útil para

---

<sup>63</sup> MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. Seawater Desalination for Freshwater Production. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 2. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

aplicaciones industriales que requieren de agua de muy elevada pureza, pero para aplicaciones domésticas o de consumo humano requiere de un proceso que la dote de minerales. La remineralización es un proceso mediante el cual se aumenta la salinidad en unos cientos de ppm, para disminuir la inestabilidad y agresividad del agua y cumplir con los criterios de potabilidad de la OMS.

El post-tratamiento puede variar dependiendo del tamaño de la planta térmica. En las plantas de mayor tamaño. A continuación se muestran los tratamientos más comunes:

- **Absorción de CO<sub>2</sub>:** Se absorbe dentro de un contactor gas-líquido para controlar el pH y aumentar el contenido de carbonatos. Este gas proviene del proceso de desaireación y es almacenado para utilizarlo en esta etapa sin ningún costo adicional. Lo mencionado previamente es una alternativa utilizada en las plantas de grandes tamaños.
- **Adición de cal (Ca(OH)<sub>2</sub>) o disolución de piedra caliza (CaCO<sub>3</sub>):** Se lleva a cabo para incrementar el contenido de carbonatos y calcio, y al igual que el dióxido de carbono, regula el pH del producto final. En plantas pequeñas suelen usarse cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) o carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) en forma sólida.
- **Adición de agua de mar desinfectada:** Se mezcla con el agua obtenida para incrementar la salinidad total a valores entre las 200 y 400 ppm.
- **Adición de hidróxido de sodio (NaOH):** Es una alternativa opcional para ajustar el pH final del producto.

En las plantas de membranas se produce regularmente agua dulce con una cantidad total de sale entre 200 y 500 ppm. Aunque esta concentración es apropiada, iones importantes (aportan beneficios a la salud humana) como el calcio y el magnesio son eliminados por completo por acción de las membranas, dando como producto un agua agresiva. Los procedimientos posteriores que se le hacen al agua desalinizada suelen ser:

- **Adición de cloruro de sodio (CaCl<sub>2</sub>) y sales de carbonato (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> o NaHCO<sub>3</sub>):** Su objetivo es aumentar la dureza del agua. Otra opción es la percolación, que no es más que pasar el líquido lentamente a través de un material poroso, por ejemplo, un lecho relleno de piedra caliza.
- **Adición de hidróxido de sodio (NaOH):** Al igual que en las plantas térmicas, se utiliza como alternativa para ajustar el pH del producto.
- **Desinfección:** Consiste en adicionar cloro o hipoclorito para certificar que el agua que se distribuirá cumple todos los requerimientos.

- Deionización: Es opcional y se utiliza cuando se necesita agua de elevada pureza, es decir, para uso industrial. Esta etapa complementaria puede ser ejecutada por una columna de resinas de intercambio iónico o una pila adicional de ósmosis inversa.

En algunos casos particulares se deben realizar pretratamientos o post-tratamientos para eliminar sílice o boro, pues algunas aguas son ricas en estos compuestos.

### **3.2.2 Destilación Multi-efecto (MED).**

La destilación multi-efecto es utilizada en una gran variedad de industrias (lácteos, azúcar, papel, ácidos, textiles y desalinización). La MED es el método más antiguo utilizado a nivel industrial para la desalinización, y se caracteriza por el elevado consumo energético que acarrea. Desde los años 50 se ha desarrollado cada vez más esta tecnología lo que ha conllevado al aumento de su capacidad instalada, aunque debe destacarse que en la actualidad es más común encontrar plantas de ósmosis inversa. Hacia el 2006 la capacidad instalada de MED era aproximadamente del 36.000 m<sup>3</sup>/día, y en la actualidad el 3,5% del agua desalada del mundo se produce por esta tecnología.<sup>64</sup>

Las principales características del proceso MED son la alta eficiencia térmica y la elevada pureza del agua obtenida. La tecnología de destilación con múltiples efectos consiste en una serie de evaporadores que funcionan bajo el principio de evaporación y condensación, reduciendo la presión de ambiente en cada uno de los efectos. Los efectos o evaporadores se ponen en serie, y a medida que el agua avanza por cada uno de ellos, la corriente de alimentación alcanza su punto de ebullición sin necesidad de suministrar calor adicional después del primer evaporador.

Para Shatat, Mahmoud & Riffat<sup>65</sup> Los sistemas MED se configuran con tubos horizontales o verticales. Inicialmente, el agua de mar es precalentada en calderas de cogeneración hasta ser llevada a su punto de ebullición, y posteriormente entra en forma de vapor al primer efecto. El principio del método ocurre en los tubos, pues dentro de ellos fluye el vapor de agua, y en su superficie exterior se rocía agua marina. La película de agua marina que se forma sobre cada tubo absorbe la energía del vapor interno, y causa que este se condense generando agua pura. Mientras tanto, el agua rociada absorbe la cantidad de energía suficiente para

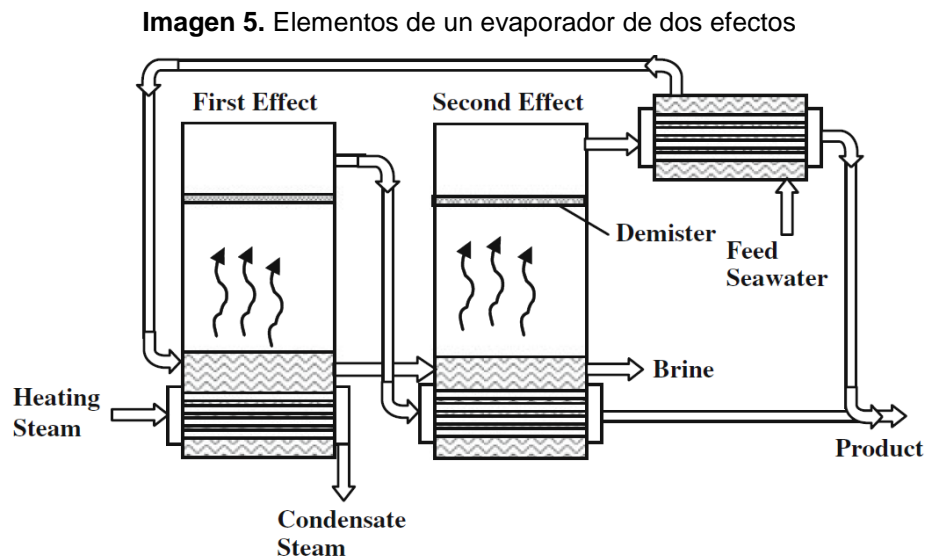
---

<sup>64</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 1. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>65</sup> ETTOUNEY, Hisham. Conventional Thermal Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 17. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

evaporarse, por lo que se abre camino hacia el siguiente efecto, no sin antes atravesar unos eliminadores de rocío encargados de atrapar gotas de salmuera remanentes. El vapor generado en el primer efecto es utilizado para provocar la evaporación en el segundo efecto tal y como se muestra en la Imagen 5.

Solo una fracción del agua marina rociada sobre los tubos del primer efecto es evaporada, la fracción restante se alimenta al segundo efecto, donde nuevamente es rociada sobre un haz de tubos que en su interior contienen los vapores generados en el primer evaporador.



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

El proceso se repite tanta veces como efectos hayan, y continúa hasta que la temperatura del vapor decrece a entre 30 y 40°C aproximadamente. La presión disminuye secuencialmente a medida que la temperatura decrece, y en algunas ocasiones se añade más calor en cada efecto para mejorar el rendimiento térmico de la planta, aunque eso implica un costo mayor. Según Younos y Khawaji<sup>66 67</sup>, el número total de efectos está limitado por varios factores, entre ellos el rango de temperatura total a disposición, y la diferencia mínima de temperatura permitida entre cada par de efectos sucesivos.

<sup>66</sup> YOUNOS, Tamim & TULOU, Kimberly. Overview of Desalination Techniques. [Universities Council on Water Resources]. Blacksburg, US: Journal of Contemporary Water Research & Education, 2005. Vol. 132, No. 1, p. 3. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>67</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 47. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

Básicamente, el método parte del hecho de que la cantidad de energía que puede almacenar el agua una vez alcanza su temperatura de ebullición disminuye cuando se reduce la presión. Lo anterior conduce a que cuando el agua salobre, a su temperatura de ebullición, circula hacia un efecto con menor presión, el exceso de energía contenido en el líquido producirá evaporación. La pérdida de energía del agua de mar provoca que su temperatura descienda hasta la temperatura de saturación correspondiente a la nueva presión de efecto.

Partiendo de lo mencionado, en el primer efecto se alimenta una corriente de vapor externa con una temperatura entre 70°C y 80°C, y en el resto de las etapas se utiliza el calor de condensación producido en la etapa inmediatamente anterior. Siguiendo esta ruta, la temperatura del agua marina incrementará desde unos 22°C hasta la temperatura del vapor de alimentación, y el condensado (producto) perderá temperatura hasta salir del proceso con una temperatura similar a la del agua de alimentación. La principal cualidad del proceso es que la totalidad de la energía es proporcionada antes de que se presente la ebullición, y en los pasos posteriores no se necesitara energía adicional, haciendo que el proceso sea termodinámicamente rentable.

La cantidad de efectos es un factor importante para determinar el consumo energético y el costo de instalación del proceso, ya que si incrementa, estos dos últimos también lo harán. En cada caso se puede determinar un número de efectos óptimo, que disminuirá cuanto más económico sea el vapor primario. Por lo que para Arreguín, Felipe & Martín<sup>68</sup>, el número de efectos habitualmente esta entre 3 y 12, aunque ocasionalmente pueden ser más.

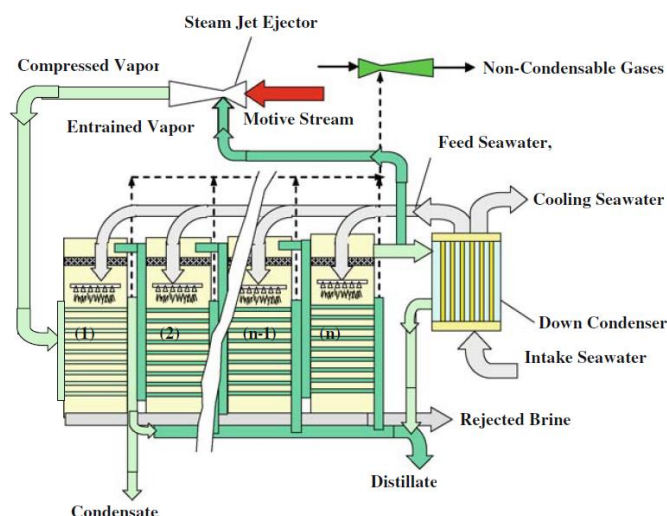
La mayoría de los procesos MED operan a temperaturas menores a 70°C. Estas condiciones limitan la velocidad de formación de incrustaciones en la superficie exterior de los tubos del efecto. Adicionalmente, operar a esta temperatura facilita un acoplamiento eficiente con sistemas de compresión de vapor mecánica o térmica. La compresión de vapor se ha desarrollado para incrementar el rendimiento del proceso (kg de producto/kg de vapor de calentamiento) a valores de aproximadamente 16 para un modelo de 12 efectos. Cuando se opera sin compresión de vapor el rendimiento puede caer hasta un valor de 8. Comercialmente, la gran mayoría de los modelos MED se encuentran adaptados para trabajar independientemente o para acoplarse a compresores de vapor térmico (MED/TVC) de una forma similar a la que se propone en la Imagen 6.

---

<sup>68</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.



**Imagen 6.** Elementos de un sistema de destilación de múltiples efectos acoplado a un sistema de compresión de vapor térmica



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

Los procesos MED son más económicos que otros procesos de desalación. Su operación a temperaturas bajas, su adaptabilidad a diferentes acoplamientos, y los materiales de construcción relativamente baratos para los tubos de transferencia de calor y las carcasas que cubren el evaporador, hacen que el proceso sea muy flexible en cuanto a sus costos.<sup>69</sup>

**3.2.3 Destilación Multi-etapa (MSF).** La desalinización Mediante MSF es un proceso que fue patentado en 1957 por el físico e ingeniero mecánico escocés Robert Silver, sin embargo el método se venía desarrollando desde inicios de los años 50. Desde aquel momento la técnica ha ido evolucionando y ha presentado varios cambios, con el objetivo de mejorar su rendimiento y aumentar notablemente la capacidad instalada de este proceso. En 1990 la capacidad era de 75.000 m<sup>3</sup> diarios, mucho más que en 1960 (500 m<sup>3</sup>/día). El proceso se ha desarrollado a tal magnitud que se puede obtener un producto con una salinidad inferior a las 10 ppm.

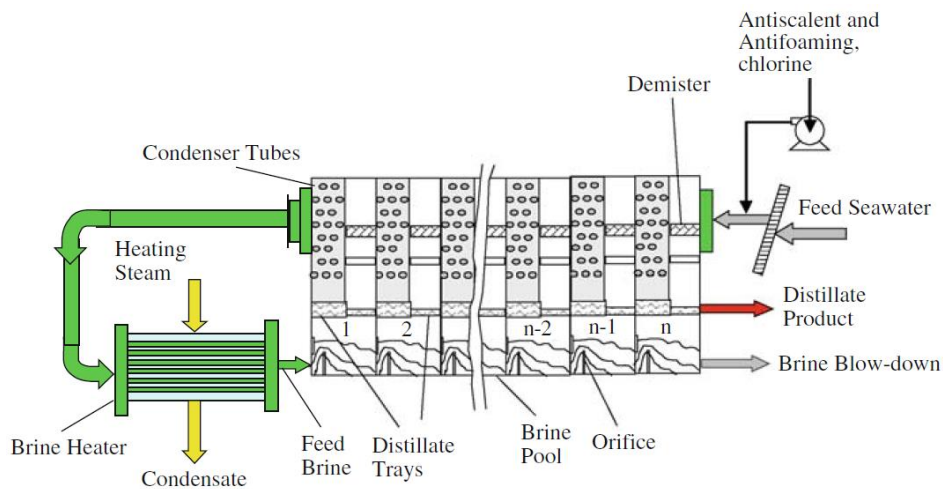
En la actualidad, las instalaciones MSF pueden funcionar continuamente durante períodos comprendidos entre 2 y 5 años, antes de que se necesite realizar revisiones y mantenimiento. Cabe destacar que recientemente se ha tomado la iniciativa de rediseñar, adaptar y mejorar las condiciones de operación de muchas plantas MSF debido a su antigüedad, y para incrementar su rendimiento,

<sup>69</sup> ETTOUNEY, Hisham. Conventional Thermal Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 17. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

competitividad y vida útil. De hecho, Para Ettouney<sup>70</sup> los procesos MSF abarcan gran parte de la capacidad de desalación global.

El proceso de destilación flash multi-etapa tiene su fundamento en el principio de la destilación flash. El agua marina es precalentada en un tanque hasta una temperatura un poco menor a la temperatura de saturación, y posteriormente se lleva a un recipiente en donde se disminuye la presión, generando un decrecimiento en el punto de ebullición del agua para lograr que el agua se evapore, y que posteriormente se condense, obteniendo así agua pura. El calor liberado en el proceso de condensación, al igual que en MED, es aprovechado, y se utiliza para el calentamiento de la salmuera en otra etapa. Lo anterior según la investigación publicada por Shatat, Mahmoud & Riffat.<sup>71</sup>

**Imagen 7.** Elementos de una configuración común de desalinización de agua de mar MSF



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

El agua de mar caliente circula secuencialmente a través de varias etapas flash, y a medida que avanza, en cada etapa la presión es menor, lo que provoca que el agua se vaporice rápidamente. A esta parte del proceso se le denomina “efecto parpadeo” debido a que el agua se convierte en vapor casi instantáneamente. La vaporización continua hasta que la salmuera se enfría, y el vapor generado se condensa en los tubos intercambiadores de calor de cada etapa. En la Imagen 7. Puede observarse que el agua de alimentación entrante enfría los tubos para

<sup>70</sup> ETTOUNEY, Hisham. Conventional Thermal Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 32. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>71</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 1. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

producir la condensación, mientras se precalienta gracias a la transferencia del calor proveniente del vapor, es decir, el proceso tiene una eficiencia térmica notable, por lo que disminuye el consumo energético requerido para incrementar la temperatura del agua de mar de entrada en cada etapa.

El producto de cada etapa se recolecta y luego es bombeado hasta un tanque de almacenamiento, mientras que la salmuera se recoge y añade a la etapa siguiente, o si se requiere, se saca del sistema. La cantidad de agua dulce producida se verá influenciada por la temperatura del agua salada y el número de etapas del proceso. El agua obtenida es de grado industrial, por lo que bajo los estudios realizados en México y por Alkaisi<sup>72</sup> <sup>73</sup>, generalmente, si se pretende usar el agua para el consumo humano, debe someterse a un proceso de remineralización.

Para calentar el agua de mar inicialmente se utiliza vapor a baja presión procedente, comúnmente de una planta de cogeneración. El evaporador generalmente se compone de múltiples etapas (entre 19 y 28) y opera a temperaturas entre los 90°C y los 120°C. Si el proceso se realiza a temperaturas mayores a 120°C se aumenta el rendimiento energético pero también crece el potencial de formación de incrustaciones en los materiales metálicos que tienen contacto con el agua de mar.

Entre las etapas se instalan orificios y deflectores que producen la reducción de la presión que lleva la salmuera hasta la presión de vapor necesaria para causar la ebullición del agua. Adicionalmente, cada etapa se provee de desempañado para reducir al máximo el arrastre de gotas de salmuera hacia el producto.

En el sistema también se instala un descarbonizador (cuando se usa ácido para inhibir la aparición de incrustaciones) y un desaireador de vacío que se encarga de eliminar los gases no condensables como el N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.<sup>74</sup>

En invierno, es muy frecuente que se mezcle una buena porción del agua marina de enfriamiento rechazada con agua recién traída del mar para controlar la temperatura del agua de entrada al proceso evitando un decrecimiento en la temperatura de la última etapa de la instalación. Si no se tienen estas precauciones el volumen específico del vapor evaporado puede aumentar, generando un incremento en la velocidad del vapor y en la cantidad de salmuera arrastrada. Al

---

<sup>72</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>73</sup> ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth & SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. [Science Direct]. Toowoomba, AU: Energy Procedia, 2016. Vol. 110, No. 1, p. 268. ISSN: 1876-6102. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

<sup>74</sup> *Ibid.*, p. 5.

agruparse todas las situaciones anteriores la calidad del producto se vería afectada negativamente.<sup>75</sup>

El proceso MSF es el proceso más desarrollado y confiable para la obtención de agua de alta pureza, pero es una técnica que requiere altos volúmenes y flujos de agua, cantidades considerables de químicos para tratamiento del agua.

El consumo energético (térmico y mecánico) es muy alto en comparación con las demás tecnologías, por lo que la mayoría de estas plantas se ubican en la región del Oriente medio, zona donde las fuentes energéticas son exuberantes y económicos.

**3.2.4 Destilación por compresión de vapor (VCD).** Las instalaciones de VCD son utilizadas comúnmente en centros turísticos, lugares de perforación e industrias donde el acceso al agua dulce es limitado. La destilación por compresión de vapor suele utilizarse en complejo con la tecnología MED o en compresión de vapor con único efecto. La característica distintiva de este proceso es que el calor que generalmente se utiliza para la evaporación del agua de mar proviene de un compresor de vapor. Estas plantas funcionan bajo el principio de la disminución de la temperatura de ebullición mediante la reducción de la presión.

Existen dos equipos para llevar a cabo este proceso: el compresor mecánico y el chorro de vapor o térmico. Su fin es el mismo, comprimen el vapor de agua para que esta se condense y genere el calor suficiente para impulsar la evaporación del agua de mar presente en el evaporador.

El compresor mecánico genera un vacío en el evaporador, para posteriormente comprimir el vapor formado en este y condensarlo dentro de un haz de tubos que atravesarán el evaporador. El agua de mar se dispersa mediante un rocío sobre la superficie externa del haz de tubos, y se evapora debido al intercambio de calor que se presenta entre los fluidos presentes al exterior y al interior del tubo. Por lo general, el compresor mecánico es propulsado gracias a energía eléctrica.

El compresor térmico posee un orificio tipo venturi a partir del cual genera y extrae vapor del evaporador, y a la par disminuye la presión. Según Shatat, Mahmoud & Riffat<sup>76</sup> el vapor es comprimido por el termocompresor, y enseguida se empieza a condensar en las paredes del tubo por el cual fluye, y al igual que en proceso con compresor mecánico, proporciona el calor necesario para llevar a cabo la evaporación del agua marina presente en la superficie exterior del tubo. En la

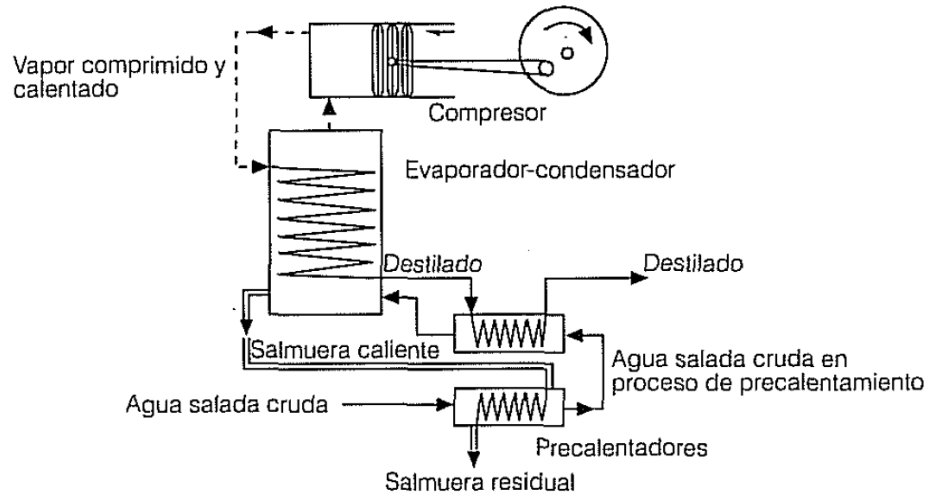
---

<sup>75</sup> ETTOUNEY, Hisham. Conventional Thermal Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 32. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>76</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 1. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

Imagen 7 se aprecia una configuración de destilación por compresión de vapor térmica y muestra la ruta del agua de mar a través del proceso hasta ser retirada cómo agua destilada salmuera residual.

**Imagen 8.** Elementos de un sistema de destilación por termo-compresión de vapor



**Fuente:** ARREGUÍN, F. & MARTÍN, A. Desalinización del agua.

Por esto, Younos, Tamim & Tulou determinaron que la destilación por compresión de vapor es una técnica confiable, sencilla y muy eficiente, que puede aumentar el rendimiento del proceso MED cuando se acopla con este<sup>77</sup>. También es destacable el hecho de que no se debe evacuar el calor de condensación, ya que es completamente aprovechado. Este proceso funciona por lo general a temperaturas de máximo 50°C, aunque en algunos casos, si el compresor es de muy elevada capacidad, se puede llegar a temperaturas de 70°C. Las condiciones previamente mencionadas desfavorecen la aparición de corrosión e incrustaciones. La salmuera residual casi duplica su concentración con respecto a la concentración de la sal marina de entrada, aportando una recuperación de aproximadamente el 50%, haciendo el proceso competitivo frente a las tecnologías de membrana (cuando se usan en agua de mar). Las instalaciones diseñadas por Khawaji<sup>78</sup> para este proceso suelen ser pequeñas, hasta una capacidad máxima promedio de 3000 m<sup>3</sup> diarios, y un consumo energético de 8 kWh/m<sup>3</sup> aproximadamente.

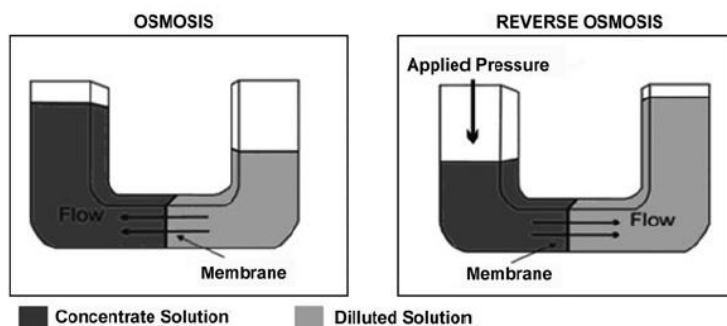
<sup>77</sup> YOUNOS, Tamim & TULOOU, Kimberly. Overview of Desalination Techniques. [Universities Council on Water Resources]. Blacksburg, US: Journal of Contemporary Water Research & Education, 2005. Vol. 132, No. 1, p. 3-10. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>78</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 47. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**3.2.5 Ósmosis inversa (OI).** La ósmosis inversa es probablemente el proceso de desalación más sencillo y que mejor rendimiento energético presenta. Se le denomina ósmosis inversa debido a que su principio es el contrario a los procesos osmóticos corrientes. Para Arreguin y Martín<sup>79</sup> en este método, la solución con mayor concentración se desplaza hacia la solución menos concentrada por acción de un diferencial de energía potencial, y usando como medio de transporte una membrana semipermeable, la cual requiere la aplicación de una fuerza externa para alcanzar un resultado aceptable en la separación.

La presión osmótica incrementa a medida que la salinidad del agua de mar aumenta, razón que lleva a que este proceso sea comúnmente utilizado en aguas salobres en vez de aguas marinas para obtener un mayor rendimiento. El proceso debe ir precedido por una serie de pretratamientos, y el agua resultante debe ser sometida a un post-tratamiento para garantizar una buena calidad en el producto, tanto en su distribución como en su almacenamiento, tal y como se menciona en la subsección 3.2.1. Y según la evaluación de Devora<sup>80</sup> sus principales ventajas frente a las demás tecnologías son su eficiencia energética y su tamaño, pues gracias a la distribución de las membranas, el espacio que estas ocupan es muy pequeño respecto a las instalaciones térmicas.

**Imagen 9.** Diagrama general de un proceso de ósmosis natural y un proceso de ósmosis inversa



**Fuente:** SHATAT, M. & RIFFAT, S. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.

El proceso de desalinización por ósmosis inversa tiene todos sus fundamentos en la membrana semipermeable y todas sus propiedades. Para determinar el rendimiento de un proceso de OI se deben tener en cuenta el flujo de agua, la tasa

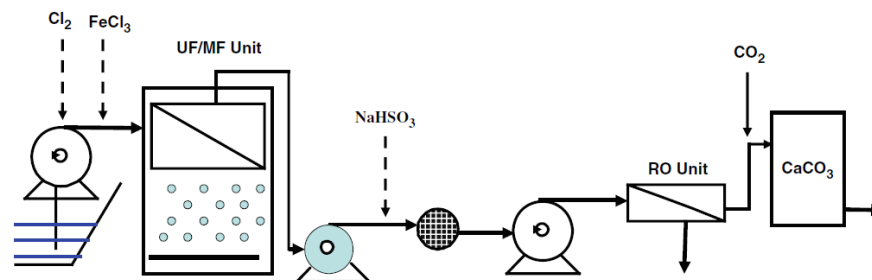
<sup>79</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

<sup>80</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

de recuperación y el rechazo de sales. Las membranas suelen rechazar al menos el 99,5% de los iones. Posee la ventaja de no tener que recurrir a calentamiento ni cambios de fase.

El agua de mar se presuriza y se hace circular a través de una membrana semipermeable, es decir, como se puede ver en la Imagen 9. la solución salina se ve obligada a transportarse desde la región de mayor concentración a la región de menor concentración gracias al impulso generado por una presión mayor a la presión osmótica, causando que el flujo natural a través de la membrana se vea invertido, y permitiendo que la membrana atrape las sales que pretenden acompañar al agua en su penetración a la membrana. Debe tenerse en cuenta que algunos compuestos presentes en el agua marina como la sílice, el hierro o la materia orgánica pueden poner en riesgo la permeabilidad de la membrana y por lo tanto, la confiabilidad del procedimiento.

**Imagen 10.** Elementos de una instalación de ósmosis inversa con pretratamiento de ultrafiltración



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

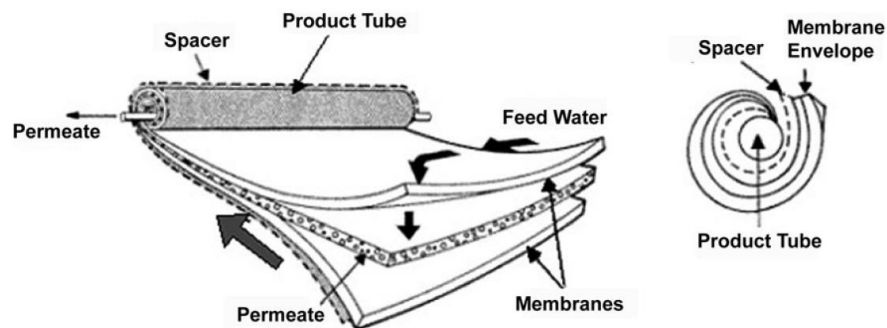
Una instalación común de ósmosis inversa posee un sistema de aprovisionamiento del agua de mar, un sistema de pretratamiento (subsección 3.2.1), un sistema de bombeo de alta presión, el módulo de las membranas y el sistema de post-tratamiento (subsección 3.2.1) según la Imagen 10.

El sistema de aprovisionamiento del agua de mar consiste en un canal por el cual entrará a la planta el agua de mar cruda. El agua se bombea y pasa a través de una serie de bastidores y pantallas de desplazamiento para eliminar los desechos que trae.

El sistema de bombeo se utiliza para el desplazamiento del agua y para suministrar la presión necesaria para que la solución salina pase a través de la membrana semipermeable encargada de inhibir el paso de las sales disueltas y permitir el paso del agua. La salmuera desechada se descarga en el mar. Las presiones de operación suelen variar entre 15 y 25 bar (aguas salobres) y entre 54 y 80 bar (agua de mar).

El módulo de las membranas se refiere a la configuración que adoptaran el conjunto de membranas semipermeables. La membrana debe poseer la suficiente fuerza para resistir la presión a la que será sometida, adicionalmente debe tener una área superficial grande para permitir que el flujo sea tan grande como sea posible. Existen membranas que soportan una presión de descarga de hasta 84 kg/cm<sup>2</sup>. Las configuraciones de membranas más utilizadas comercialmente son la de fibra espiral hueca y la de fibra fina hueca (HFF), pues tienen las propiedades para desalinizar aguas salobres o marinas.

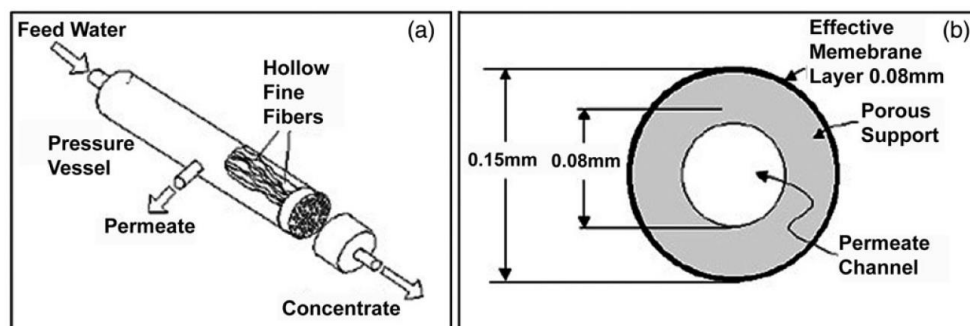
**Imagen 11.** Configuración de una membrana en espiral



**Fuente:** SHATAT, M. & RIFFAT, S. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.

La membrana enrollada en espiral es fabricada comúnmente como una lámina plana de diacetato de celulosa y una película delgada hecha de una mezcla de triacetato y polímeros como poliamida, polisulfona o poliurea. La Imagen 11 ilustrada por Shatat<sup>81</sup> representa más fácilmente este tipo de configuración.

**Imagen 12.** Configuración de una membrana HFF



**Fuente:** SHATAT, M. & RIFFAT, S. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.

<sup>81</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 1. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.



La membrana HFF se basa en un haz de fibras en forma de U albergado en un recipiente a presión. La membrana está hecha de triacetato de celulosa y poliamida. Esta configuración permite que el área de superficie específica más alta de todas las configuraciones de módulos cómo se puede observar en la Imagen 12., lo que reduce el tamaño de la planta.<sup>82</sup>

El mayor obstáculo para esta tecnología es adquirir membranas económicas y con una buena resistencia a la presión diferencial que se aplicará. Actualmente se realizan diferentes estudios para mejorar y evolucionar en estas características.

Lo descrito por Arreguin<sup>83</sup> en el proceso es que el agua de mar que entra al proceso debe tener determinadas características para que la técnica se lleve a cabo adecuadamente. La turbidez y los sólidos en suspensión deben ser muy bajos. En cuanto a los sólidos disueltos, la ósmosis inversa puede operar a salinidades de hasta 45.000 ppm pero es recomendable utilizar salinidades menores debido a que el contenido de SDT del producto no permitirá una calidad suficiente para usos como el industrial, así mismo, el consumo energético y el costo final del producto están fuertemente ligados al contenido de sólidos disueltos totales tanto al inicio como al final del procedimiento.

**Tabla 8.** Propiedades de las membranas comerciales utilizadas para osmosis inversa de agua de mar

PROPIEDAD	MEMBRANA				
	SWC4+	SWC5	TM820-400	SW30HR-LE	SW30HR-XL3
Área efectiva (m <sup>2</sup> )	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Flujo de permeado (m <sup>3</sup> /día)	24,6	34,1	24,6	26,5	34,1
Rechazo de sales (%)	99,80	99,80	99,75	99,75	99,70
Sales que pasan (%)	0,20	0,20	0,25	0,25	0,30
Tasa de flujo (L/m <sup>2</sup> .h)	27,6	38,2	27,6	31,3	38,2
Permeabilidad (L/m <sup>2</sup> .h.bar)	1,0	1,5	1,0	1,2	1,5
Transporte relativo de sales (Sales que pasan x Tasa de flujo)	0,055	0,076	0,069	0,078	0,114

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

Para determinar la efectividad de una membrana es trascendental conocer la tasa de recuperación del proceso. Esta tasa se conoce cómo el volumen de agua dulce producida con respecto al volumen del agua que entra al proceso de separación. Por lo general, la tasa de recuperación de un proceso de OI puede encontrarse entre

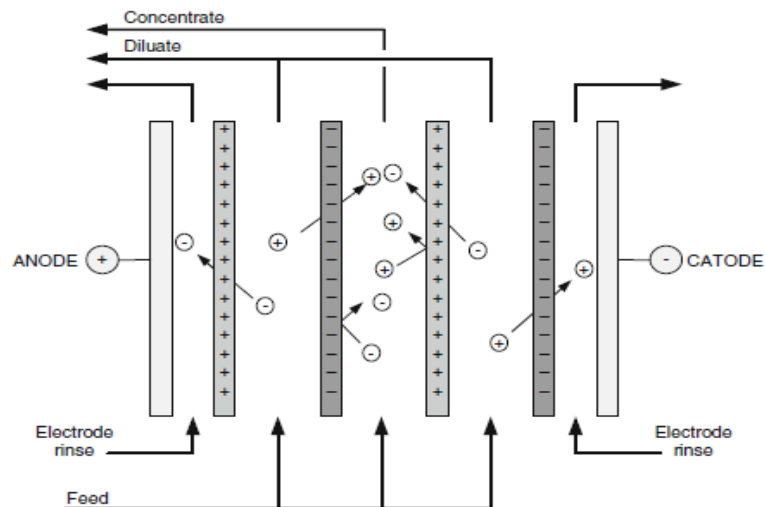
<sup>82</sup> *Ibíd.*, p. 2.

<sup>83</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

el 30 y 80%, dependiendo de factores como la calidad del agua de entrada, la presión de proceso, etc. Hoy en día se han desarrollado membranas con capacidad de operar a bajas presiones manteniendo una tasa de recuperación muy alta. Estas membranas se componen de una película delgada de polímeros, y una capa superficial con carga negativa, y con una resistencia notable a las incrustaciones según los estudios descritos en la revista *Journal of Contemporary Water Research & Education*<sup>84</sup>. La tabla 8 muestra las principales propiedades de las membranas.

**3.2.6 Electrodialisis (ED).** Este método se ha utilizado desde los años 50, cuando se usaba para obtener agua dulce de pozos salobres en el desierto de Arabia. La electrodialisis es un proceso de separación no convencional y de carácter electroquímico, que separa las sales del agua por medio de la migración de los iones a través de membranas de intercambio iónico. El sistema se encuentra influenciado por la aplicación de un campo eléctrico. La fuerza impulsora es la fuerza electromotriz aplicada en cada uno de los electrodos dispuestos a cada lado de la pila de membranas.

**Imagen 13.** Elementos de un modelo general del proceso de electrodialisis



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

Según Curcio y Drioli<sup>85</sup> una pila de electrodialisis está compuesta por una serie de pares de membranas de intercambio iónico, un cátodo y un ánodo. Cada par de membranas tiene una membrana de intercambio aniónica y una membrana de

<sup>84</sup> YOUNOS, Tamim & TULOU, Kimberly. Overview of Desalination Techniques. [Universities Council on Water Resources]. Blacksburg, US: *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 2005. Vol. 132, No. 1, p. 3. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>85</sup> CURCIO, Efrem & DRIOLI, Enrico. Membranes for Desalination. [Google Academic]. *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 41. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

intercambio catiónica, y se acomodan alternándose, es decir, en ningún momento se disponen consecutivamente dos membranas con la misma carga. Los espacios entre las membranas generan pequeños compartimientos de soluciones concentradas y diluidas, como puede apreciarse en la Imagen 13.

Inicialmente se aplica una diferencia de potencial eléctrico en cada uno de los electrodos. El agua de alimentación ingresa por los compartimientos que se forman entre las membranas y, de acuerdo al sentido de la corriente, un compartimiento empieza a disminuir su concentración de sales mientras que los compartimientos contiguos incrementan su cantidad de iones. Los compartimientos se empiezan a alternar entre compartimientos de diluido (los que ceden sus iones) y compartimientos de concentrado (los que reciben las sales). La transferencia de iones se da a través de membranas de intercambio iónico selectivas, por ejemplo, las membranas de intercambio aniónico solo permiten el paso de cationes, mientras que en las membranas de intercambio catiónico solo fluyen los aniones. Dichas membranas se ubican paralela una de la otra.

La reducción de salinidad es aproximadamente de un 40%. La desalinización mediante electrodiálisis suele ser utilizada para reducir el contenido de SDT de aguas salobres, pero no para agua de mar, por lo que su competitividad se restringe solo con las tecnologías que desalan aguas con un contenido de sólidos disueltos totales inferior a 5.000 ppm. En la electrodiálisis, el consumo de energía es proporcional al contenido de SDT, por lo que el costo de esta tecnología puede incrementar considerablemente si se utiliza agua de mar en la entrada del proceso. Adicionalmente, si la intensidad de corriente aplicada es muy alta, las membranas aumentan su susceptibilidad a la polarización y la aparición de incrustaciones.<sup>86</sup>

La densidad de corriente para que la técnica se realice adecuadamente debe ser menor a la densidad de corriente límite. También es destacable el hecho de que la recuperación de agua aumenta a medida que la concentración de NaCl es más alta, aunque un exceso puede causar problemas de corrosión e incrustaciones. Si se siguen todas las recomendaciones, las tasas de recuperación de agua suelen variar entre el 75% y el 90%, y los costos de las instalaciones son muy económicos con respecto a otras tecnologías. Aunque las membranas son costosas, tienden a

---

<sup>86</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 30. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

poseer una elevada resistencia física y química, por lo que son de prolongada duración. La presión de operación está entre 79 y 90 psi.<sup>87 88</sup>

Existe un método alternativo denominado electrodiálisis reversible (EDR), el cual permite obtener recuperaciones más elevadas en comparación con la electrodiálisis común. Esto ocurre debido a que puede invertir su polaridad cíclicamente cada 15-20 minutos, generando una auto-limpieza en las superficies de las membranas que se encuentran en contacto con el compartimiento de concentrado, disminuyendo el potencial de aparición de incrustaciones y la polarización.<sup>89</sup>

### 3.3 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN

En la sección 3.2 se describieron los principales procesos de desalinización adoptados en todo el mundo. A continuación se realiza una comparación, teniendo como referencia las ventajas y desventajas de cada proceso.

**Cuadro 2.** Ventajas y desventajas de las principales tecnologías de desalinización

PROCESO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La calidad del agua alimentada no es tan determinante. Costos de pretratamiento bajos.</li> <li>- El consumo de energía es menor que en una planta de MSF.</li> <li>- Puede operar de 0 a 100% de su capacidad total desde que se mantenga el vacío.</li> <li>- Es más eficiente en términos energéticos y de costo de producción de agua dulce.</li> <li>- Puede acoplarse a otros sistemas térmicos o de energías renovables.</li> <li>- El rango de salinidades a las que puede operar es muy amplio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se necesitan químicos anti-incrustantes para evitar la formación de incrustaciones en la superficie interna del evaporador.</li> <li>- Alta complejidad operacional.</li> </ul>
MSF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La calidad del agua de alimentación no es tan determinante como en los procesos de membrana.</li> <li>- Fácil de construir y operar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No puede operar a menos del 60% de su capacidad total.</li> <li>- No es recomendable acoplarlo con energías renovables.</li> </ul>

<sup>87</sup> YOUNOS, Tamim & TULOU, Kimberly. Overview of Desalination Techniques. [Universities Council on Water Resources]. Blacksburg, US: Journal of Contemporary Water Research & Education, 2005. Vol. 132, No. 1, p. 5. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>88</sup> CURCIO, Efreim & DRIOLI, Enrico. Membranes for Desalination. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 42. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>89</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 30. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Cuadro 2.** (Continuación)

<b>PROCESO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
MSF	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede procesar agua con una salinidad de hasta 70.000 mg/L.</li> <li>- La pureza del agua es muy alta (&lt;10 ppm de SDT).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Es la técnica de desalinización que requiere un mayor consumo energético.</li> <li>- Agregar más etapas mejora su eficiencia pero aumenta costos de capital y operación.</li> </ul>
VCD	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fácil de operar. Escalas &lt;3.000 m<sup>3</sup>/día.</li> <li>- Opera a bajas temperaturas, disminuyendo problemas de corrosión y consumiendo menos energía que MSF y MED.</li> <li>- Puede acoplarse a MED.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Su tasa de eliminación de sales es de aproximadamente 50% por lo que no puede competir con los procesos térmicos MED y MSF.</li> </ul>
OI	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se opera a temperatura ambiente, reduciendo los problemas de corrosión.</li> <li>- Se utilizan materiales poliméricos en vez de aleaciones metálicas.</li> <li>- La tasa de recuperación es muy baja cuando las salinidades son muy altas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensuciamiento de las membranas.</li> <li>- Configuración compleja. Requiere personal calificado para operación y mantenimiento.</li> <li>- Los pretratamientos son muy importantes para una adecuada operación.</li> </ul>
ED	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Las membranas tienen una duración de hasta 15 años si se siguen recomendaciones.</li> <li>- Al acoplarse con OI pueden generarse tasas de recuperación de hasta el 98%.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Más costosa que la OI.</li> <li>- Solo se puede utilizar en aguas salobres (&lt;10.000 ppm).</li> <li>- Los pretratamientos son muy importantes.</li> </ul>

El Cuadro 2. Compara las tecnologías térmicas y de membrana. Para escoger alguno de los procesos debe tenerse en cuenta cuál es el factor prioritario: La pureza del agua, el consumo energético, costos y facilidad de operación, pretratamientos y post-tratamientos, acoplamiento a alternativas, etc.

#### 4. SITUACIÓN GLOBAL DE LA DESALINIZACIÓN

Los procesos de desalinización que abarcan la mayor parte del mercado son la destilación multi-efecto (MED), destilación multi-etapa (MSF), la ósmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (ED), esta última en menor medida y limitada solo a aguas salobres. La técnica de ósmosis inversa es la de mayor capacidad instalada, con cerca del 50% del total. No obstante, esta habitualidad y preferencia no se da en todo el planeta, por ejemplo, en los países del medio oriente las tecnologías dominantes son aquellas que usan energía térmica, es decir, MED, MSF y VC. Se espera que el dominio de las tecnologías de desalinización térmica en esta región del planeta se mantenga por un período considerable, debido a la elevada confiabilidad operacional, la posibilidad de acoplamiento con otros sistemas y el costo y la accesibilidad de la energía térmica en estos países. Con el tiempo, y según investigaciones realizadas en Palermo, Italia<sup>90</sup>, la competitividad de la OI frente a la desalinización térmica aumentará, debido a que la diferencia en cuanto a requerimientos energéticos es muy grande, además, la creciente tendencia a la privatización del mercado de la desalinización en los países del golfo árabe aumentará la capacidad instalada de la ósmosis inversa, ya que es un proceso más económico.

Aunque hay cuatro técnicas que compiten por el protagonismo en el proceso de la desalinización, existen dos que engloban casi la totalidad del mercado, la OI con el 50% y la MSF con el 40% aproximadamente. La ósmosis inversa sigue expandiéndose vertiginosamente gracias a las investigaciones y el constante desarrollo de las membranas, mejorando su eficiencia y propiedades, y reduciendo sus costos así como el consumo energético del proceso. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el constante estudio y mejoramiento de la técnica, trae consigo confiabilidad y experiencia en el diseño, fabricación, operación y mantenimiento. Otro aspecto importante es el rango de salinidades al que puede operar, pues puede procesar aguas marinas, salobres o residuales. Es tal la importancia que ha adquirido la ósmosis inversa que algunos países como Estados Unidos, Chipre, España o Malta, la tienen como principal método de desalación (por encima del 90% de su capacidad instalada).

Pero no solo la OI ha evolucionado, de hecho, las instalaciones MSF han aumentado su competitividad construyendo unidades con una capacidad entre 50.000 y 70.000 m<sup>3</sup> diarios, lo que implica un decrecimiento en los costos de capital y de producción del agua. La destilación multi-etapa es una tecnología aplicada, principalmente, en los estados del golfo pérsico, además, es el proceso industrial de desalinización más antiguo y desarrollado, sin mencionar la ventaja energética que posee la zona.

---

<sup>90</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 77. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

Las técnicas térmicas definidas por Ettouney<sup>91</sup> MED y VC tienen menos preferencia en el Oriente medio. La primera presenta desventajas en cuanto a su capacidad de producción por cada unidad, sin embargo, al consumir menos energía que el proceso MSF puede ganar aceptabilidad en situaciones donde la energía térmica no es tan económica ni de tan fácil acceso. La segunda tecnología no es muy utilizada debido su capacidad de producción, pues es mucho menor con respecto a los demás procesos térmicos de desalación.

En pocas palabras, las plantas de desalinización térmicas siguen creciendo, aunque con menos aceleración, en los países del Medio Oriente<sup>92</sup>, mientras que la ósmosis inversa se ha expandido en Europa, América y Australia.

Las membranas actuales de ósmosis inversa permiten que las unidades funcionen a presiones más bajas, y de como producto agua potable en un solo paso. Inicialmente, las instalaciones de OI se construyeron en lugares áridos que tuvieran poco acceso a energías térmicas, y que tuvieran que cubrir una alta demanda de agua debido a la elevada afluencia de turista, por ejemplo, Islas canarias, Malta o el Caribe. En la actualidad el proceso ha sido adoptado en todo el planeta, incluso en aquellos países donde dominaban las tecnologías térmicas, y hacia 2009 se estimaba que la capacidad de producción de agua a partir de desalinización por métodos de ósmosis inversa<sup>93</sup> era cercana a los 15 millones de m<sup>3</sup> diarios, y que la tasa anual de crecimiento era del 10%.

En el 2006 la capacidad instalada de desalinización era de aproximadamente 3'350.000 m<sup>3</sup>/día, y más de la mitad de las plantas de desalinización instaladas en el planeta poseían una capacidad de producción menor a 10.000 m<sup>3</sup> diarios. Lo anterior corresponde a que el uso del agua obtenida era, en un 66% para uso doméstico, y en un 23% para uso industrial. Así mismo, observando la Gráfica 8. es destacable el hecho de que el agua de alimentación proviene, en gran parte de recursos hídricos de gran abundancia, en especial el agua de mar (66%) y las aguas salobres (22%), y de que se está haciendo un esfuerzo importante por impulsar la desalinización de aguas residuales, generando conciencia de uso y cuidado del recurso.

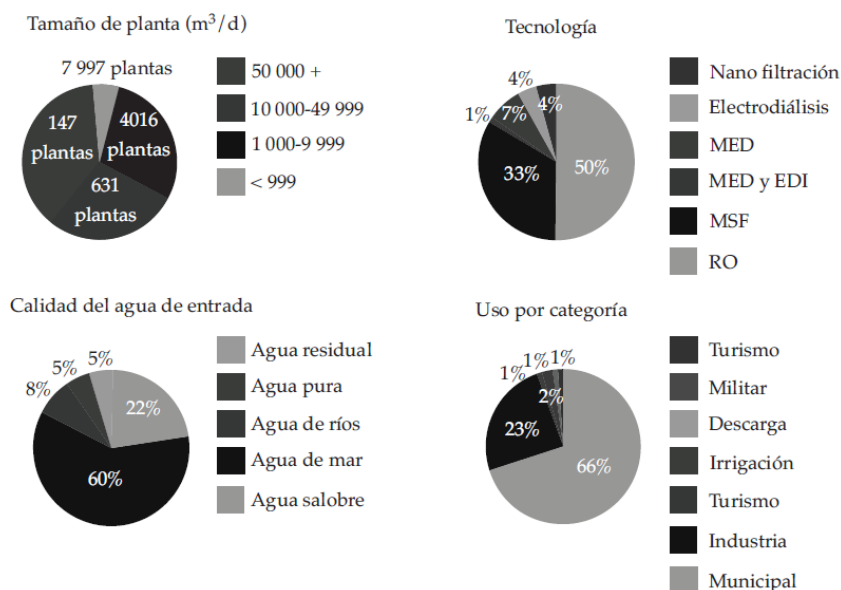
---

<sup>91</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 78. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>92</sup> *Ibid.*, p. 101.

<sup>93</sup> *Ibid.*, p. 79.

**Gráfica 8. Perfil global de la Desalinización**



**Fuente:** DÉVORA, G.; GONZÁLEZ, R. & RUÍZ, S.. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México.

Para el 2013 existían cerca de 13.000 plantas instaladas globalmente, generando una cantidad de agua de aproximadamente 25 millones de m<sup>3</sup> diarios; los métodos de desalinización más utilizados eran la ósmosis inversa, destilación multi-etapa, destilación multi-efecto y la electrodiálisis, en ese orden según lo descrito en la evaluación de los procesos de desalinización en México<sup>94</sup>. Hoy en día se mantiene el mismo orden pero con diferentes proporciones, pues las técnicas de membrana se han desarrollado a tal nivel que superan ampliamente en preferencia, a las técnicas térmicas.

Los procesos de evaporación para la obtención de agua dulce a partir de agua salada han sido utilizados por la industrial del petróleo desde la segunda guerra mundial. Inicialmente las instalaciones tenían capacidades menores a 500m<sup>3</sup> diarios, pero desarrollos posteriores llevaron a que la tecnología de la MED alcanzara capacidades cercanas a los 5.000 m<sup>3</sup>/día por cada unidad. Actualmente, las unidades de evaporación de los procesos MED alcanzan capacidades mayores a 36.000 m<sup>3</sup>/día, y gracias a su operación a bajas temperaturas, se disminuye la posibilidad de aparición de incrustaciones y otros fenómenos de corrosión, así como se aumenta la eficiencia del proceso al acoplarse con sistemas de compresión de vapor.

<sup>94</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.



El proceso MED posee capacidades de producción mucho más pequeñas que la tecnología MSF. Bajo las investigaciones de Ettouney, Hisham & Wilf<sup>95</sup>, en cuanto a la desalinización térmica, MED solo acoge el 12,5% del mercado, mientras que en la capacidad total instalada de desalación cubre un 6% aproximadamente. La mayoría de estas instalaciones se encuentran en los países del golfo pérsico.

La técnica de MSF domina casi el 90% de la desalinización por métodos térmicos, y cubre alrededor del 40% de la oferta global de desalinización de agua de mar. El pasar de los años ha hecho que el proceso MSF adquiriera una alta confiabilidad gracias a su continuo crecimiento y desarrollo. El proceso MSF es el que más consume energía de todos los procesos de desalación ( $17-18 \text{ kWh}_{\text{equiv}}/\text{m}^3$ ), pero su elevado rendimiento y la pureza del producto obtenido han hecho que tanto MED como MSF mantengan su competitividad frente a los procesos de membrana. Algunos factores como la vida útil de las plantas (cercana a 40 años), la posibilidad de readecuar las instalaciones, la accesibilidad a energía térmica y el aumento de la capacidad de producción de cada unidad ( $50.000 - 70.000 \text{ m}^3/\text{día}$ ), reducen los costos del producto final, por lo que países como Kuwait, Arabia Saudita o los Emiratos Árabes Unidos<sup>96</sup> lo tienen como técnica principal para abastecerse de agua potable, es decir, las instalaciones a gran escala de este tipo de tecnología se encuentran solo en los países del Medio Oriente.

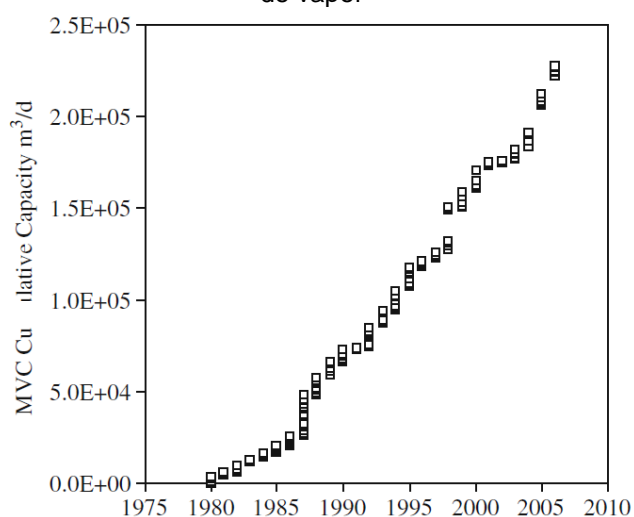
La técnica de compresión de vapor, térmica y mecánica, se desarrolló en los años 80, sin alcanzar gran relevancia, y siendo importante solo a la hora de acoplarse a un sistema MED. El método de la compresión de vapor mecánica se realizó para tener un proceso de desalinización térmica que funcionara solo con energía térmica, sin embargo, el crecimiento acelerado de la ósmosis inversa estancó el uso de la VC. La capacidad de producción global de la compresión de vapor mecánica es menor a  $250.000 \text{ m}^3$  diarios, lo que es menor a la capacidad de producción de una planta a gran escala de cualquiera de los otros procesos principales de desalación (OI, MSF y MED).

---

<sup>95</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 81. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>96</sup> *Ibid.*, p. 84.

**Gráfica 9.** Evolución de la capacidad instalada acumulada de la desalinización por compresión de vapor



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

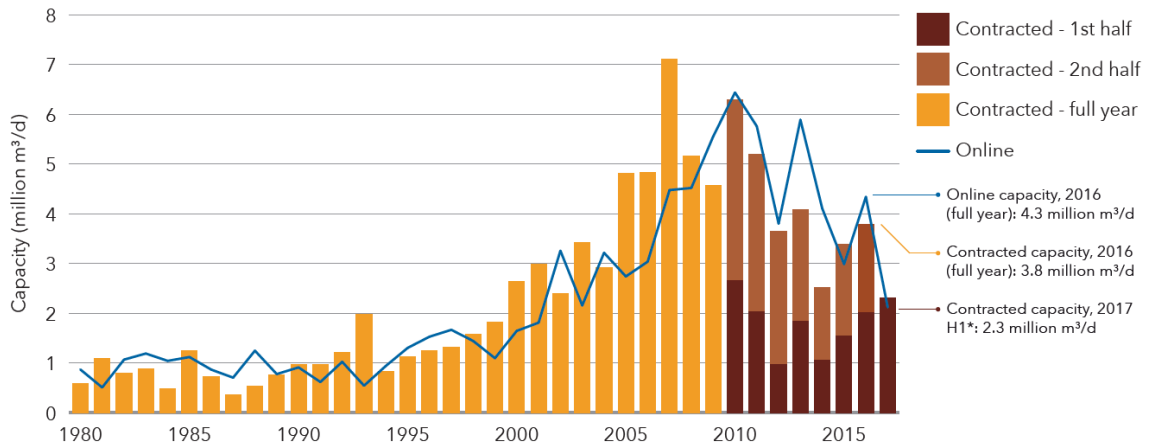
La Gráfica 9 muestra la evolución de la capacidad instalada del proceso de compresión de vapor. Existe un aumento constante, pero de muy pequeñas proporciones, debido a que las capacidades de producción de las instalaciones de VC son menores a 20.000 m<sup>3</sup>/día<sup>97</sup>. De acuerdo a lo anterior, es posible inferir que esta técnica será utilizada únicamente para abastecer pequeñas comunidades o zonas industriales, por lo que está condenada a permanecer en desventaja frente a los demás procesos de desalinización.

Los avances tecnológicos han permitido el crecimiento acelerado de la desalinización. En el 2008 Global Water Intelligence informó en su 'IDA Desalination Yearbook' que la capacidad global contratada se incrementó en un 43% en comparación con la capacidad contratada del 2006. Este crecimiento se ve influenciado por gran cantidad de factores, por ejemplo, mayor costo y menor disponibilidad del abastecimiento común de aguas superficiales y subterráneas, economías y poblaciones en áreas altamente dependientes de la desalación del agua, el impacto del cambio climático y el aumento de sequías, el aumento de las poblaciones costeras, y el descenso de los costos de los procesos de desalinización. Para mediados del 2008 habían más de 14.000 plantas de desalación distribuidas en más de 150 países, destacándose regiones como el Medio Oriente, África del Norte, Europa, Australia, Estados Unidos y Japón; la

<sup>97</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 83. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

capacidad acumulada instalada y actualmente en funcionamiento correspondía a 52,3 millones de m<sup>3</sup> diarios de acuerdo a lo mencionado por förare y henthorne<sup>98</sup>.

**Gráfica 10.** Incremento de la capacidad instalada contratada y disponible online (1980-2017)



**Fuente:** International Desalination Association. IDA Desalination Yearbook 2017-2018.

Según la IDA<sup>99</sup> (Asociación Internacional de Desalinización), en la primera mitad del 2017 la capacidad global acumulada de desalación es de 99,8 millones de m<sup>3</sup> diarios. El crecimiento con respecto a la primera mitad del año 2016 es del 14% (282.000 m<sup>3</sup>/día) como se refleja en la Gráfica 10., y se ve potenciado gracias al sector de servicios públicos, especialmente por las nuevas adjudicaciones en los países del golfo, así como por el sector industrial, debido a la estabilización del precio del petróleo y el gas.

Algunos procesos como la precipitación, congelación o el intercambio iónico no se utilizan a gran escala. La ósmosis inversa se mantendrá como el proceso dominante, cubriendo actualmente el 65% del mercado, mientras que el elevado consumo energético de las plantas térmicas provocará una desaceleración en el crecimiento de la capacidad instalada de los procesos MED y MSF bajo lo indicado por Zarzo y Prats.<sup>100</sup>

La desalinización es una alternativa importante para disminuir la crisis hídrica mundial, sin embargo, debe tenerse en cuenta que es solo una pequeña parte de la

<sup>98</sup> FÖRARE, Jonas & HENTHORNE, Lisa. Desalination: A Critical Element of Water Solutions for the 21st Century. [Google Academic]. 1ª ed. Estocolmo, SE: The Swedish Research Council Formas, 2009. p. 47. ISBN: 978-91-540-6034-4. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>99</sup> INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION. IDA Desalination Yearbook 2017-2018. [Google Academic]. 1ª ed. Oxford, GB: Media Analytics Ltd., 2018. p. 1. ISBN: 978-1-907467-52-3. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

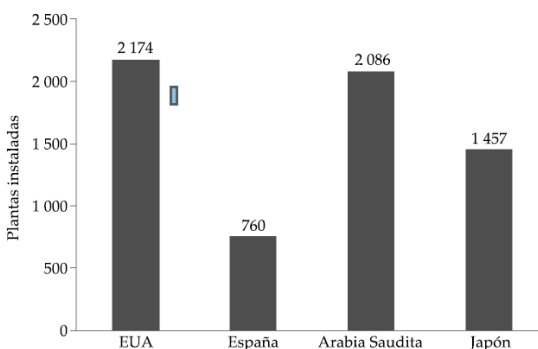
<sup>100</sup> ZARZO, Domingo & PRATS, Daniel. Desalination and energy consumption: What can we expect in the near future?. [Elsevier Science Publishers]. Alicante, ES: Desalination, 2017. Vol. 427, No. 1, p. 2. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

solución para el abastecimiento de agua potable. Para Forage<sup>101</sup> la conservación del agua, la gestión de la demanda y la disminución vehemente de las fugas contribuyen también, en gran medida, a la creación e implementación de sistemas sostenibles para el abastecimiento de agua en el siglo XXI.

#### 4.1 PAÍSES LÍDERES EN LA DESALINIZACIÓN

Según la IDA, para el 2007 los países con mayor cantidad de instalaciones (Gráfica 11.) de desalinización fueron: Estados Unidos con 2.174 plantas, es decir, el 34% del número total de plantas, de las cuales el 72% son de ósmosis inversa, Arabia Saudita con 2.086 instalaciones (32%), siendo un 65% de MSF, Japón con 1457 plantas (22%), donde en su mayoría (90%) son de ósmosis inversa, y España con 760 plantas, de las cuales más del 90% pertenecen a ósmosis inversa. Otros países que poseían un número de plantas entre 100 y 300 son: Libia, India, China, Argelia, Bahrein, Australia y Omán.

**Gráfica 11.** Países con más plantas desaladoras en el 2007



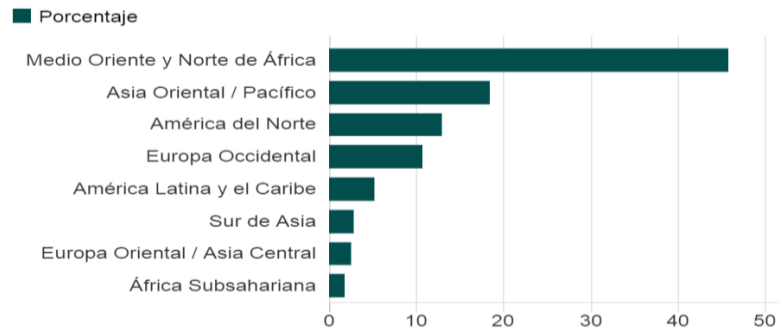
**Fuente:** DÉVORA, G.; GONZALEZ, R. & Ruíz, S. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México.

En cuanto a capacidad de producción, el país con mayor cobertura a nivel mundial en el 2007 era Arabia Saudita (24,4%), seguido de EAU y Kuwait. Los usos finales y la naturaleza de las aguas de alimentación se reparten tal y como se muestra en la Gráfica 8. Según la Evaluación de procesos de desalinización realizada por Devora, Gonzalez y Ruiz<sup>102</sup> el déficit de hidrocarburos ha llevado a algunos países a desarrollar con gran éxito los procesos de desalinización por membranas, aumentando la preferencia hacia esta tecnología.

<sup>101</sup> FÖRARE, Jonas & HENTHORNE, Lisa. Desalination: A Critical Element of Water Solutions for the 21st Century. [Google Academic]. 1ª ed. Estocolmo, SE: The Swedish Research Council Formas, 2009. p. 47. ISBN: 978-91-540-6034-4. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>102</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 32. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Gráfica 12.** Porcentaje de la capacidad de desalinización por región



**Fuente:** MARTINS, A. ¿Puede la desalinización ser la solución para la crisis mundial del agua? Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

La mayor planta desaladora del mundo es la planta de Ras Al-Khair en Arabia Saudita. La región con mayor capacidad de desalinización es el Medio Oriente con 46% de la capacidad de producción total, seguida de Asia Oriental con el 18%, América del Norte 13%, Europa Occidental con el 11%, América Latina y el Caribe con el 5%, Sur de Asia con el 3%, Europa Oriental y Asia Central con el 2% y África Subsahariana con el 2%, como se muestra en la Gráfica 12 realizada por Martins.<sup>103</sup>

**Tabla 9.** Plantas con mayor capacidad de desalinización en el mundo

Planta	País	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)
1. Ras Al-Khair	Arabia Saudita	1'040.000
2. Jubail	Arabia Saudita	947.890
3. Shoaiba	Arabia Saudita	880.000
4 Taweehah	Emiratos Árabes Unidos	740.000
5. Umm al Nar	Emiratos Árabes Unidos	660.000
6. Jebel Alí	Emiratos Árabes Unidos	640.000
7. Fujairah 1	Emiratos Árabes Unidos	590.000
8. Fujairah 2	Emiratos Árabes Unidos	590.000
9. Yanbu	Arabia Saudita	550.000
10. Soreq	Israel	540.000

**Fuente:** MARTINS, A. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua?. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

Las plantas de desalinización con mayor capacidad de producción (Tabla 9.) en el mundo se basan en la tecnología MSF y se encuentran ubicadas en regiones donde los combustibles fósiles son abundantes y económicos.

<sup>103</sup> MARTINS, Alejandra. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua? [Sitio web]. Noticias. 22 de Marzo del 2017. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

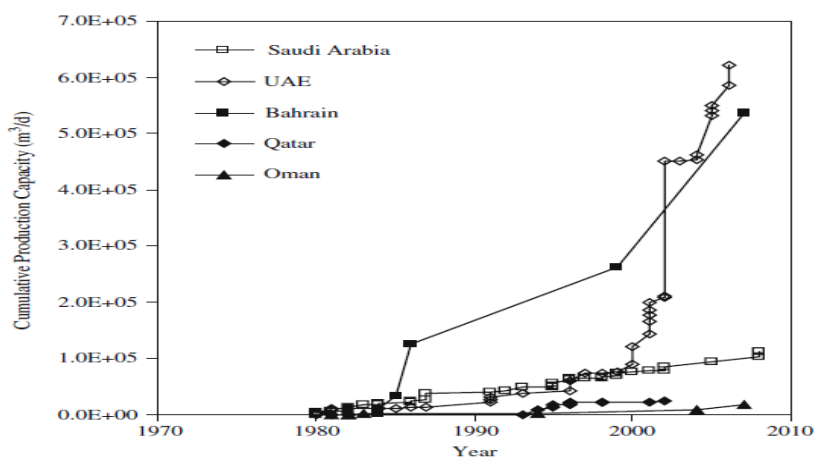
**Gráfica 13.** Ubicación de las 10 plantas de desalinización con mayor capacidad de producción en el mundo



**Fuente:** MARTINS, A. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua? Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

Las grandes plantas de desalación están ubicadas alrededor del golfo pérsico (Gráfica 13) en Arabia Saudita y los Emiratos Árabes Unidos, países con escasez de agua dulce según el reportaje de Martins.<sup>104</sup>

**Gráfica 14.** Evolución de la capacidad de producción acumulada de las plantas MED en los países del golfo pérsico



**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

<sup>104</sup> MARTINS, Alejandra. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua? [Sitio web]. Noticias. 22 de Marzo del 2017. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

La Gráfica 14 permite observar la capacidad de producción acumulada del proceso MED en los países del golfo pérsico hasta el 2009. En algunos países como Arabia Saudita, Qatar u Omán, la producción de agua dulce a partir de MED es inferior a 100.000 m<sup>3</sup>/día, un poco más que una unidad de gran escala de MSF. En otras zonas, como Bahreín y los Emiratos Árabes Unidos la capacidad de producción es mayor, llegando a valores cercanos a los 600.000 m<sup>3</sup> diarios, sin embargo, esta capacidad de producción es menos del 10% de la capacidad de producción de las instalaciones de MSF de los Emiratos Árabes Unidos. En Kuwait no se utiliza la tecnología de destilación multi-efecto.

**Tabla 10.** Instalaciones MED recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)

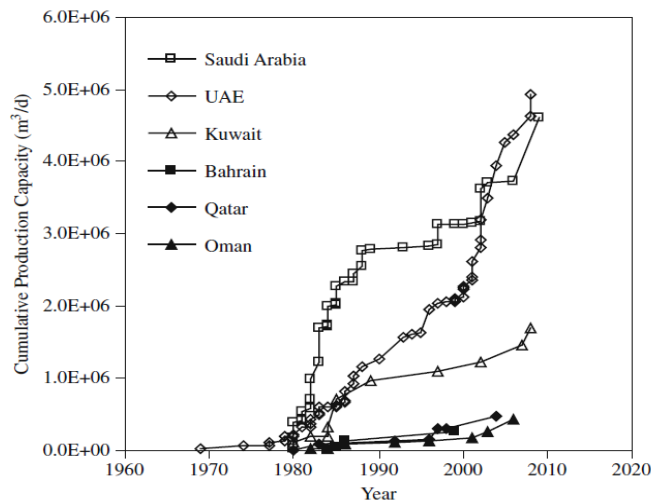
País	Localización	Año	Número de unidades	Capacidad por unidad (m <sup>3</sup> /día)	Nota	Fabricante
Italia	Trapani	1993	4	9.000	TVC	VWS Sidem
Antillas Holandesas	Curazao	1996	1	12.000	TVC	VWS Sidem
EAU	Jebel Dhana	1996	2	9.090	TVC	VWS Sidem
EAU	Ras Al Khaimah	1997	2	6.820	TVC	VWS Sidem
India	Jamnagar	1998	2	12.000	TVC	IDE
Italia	Priolo Gargallo	1998	2	7.200	Cogeneración	VWS Sidem
Holanda	Rotterdam	1999	2	12.000		VA TECH
Bahreín	Askar	2000	4	10.750	TVC	VWS Entropie
España	Las Palmas	2000	2	17.500	TVC	IDE
EAU	Umm Al Nar	2000	2	15.911	TVC	VWS Sidem
EAU	Layyah	2001	2	22.848	TVC	VWS Sidem
EAU	Ajman	2001	2	6.819		Sasakura
Libia	Tobruk	2002	3	13.333	TVC	VWS Sidem
EAU	Al Taweelah	2002	14	17.143	TVC	VWS Sidem
Irán	Ban Azzaluyeh	2004	5	7.500	TVC	VWS Sidem
EAU	Kalha	2004	1	9.090	TVC	VWS Entropie
China	Huanghua	2005	2	10.000	TVC	VWS Sidem
India	Jamnagar	2005	1	15.000	TVC	IDE
Libia	Zuara	2005	3	13.333		VWS Sidem
EAU	Ras Al Khaimah	2005	3	22.730	TVC	VWS Sidem
EAU	Layyah	2006	4	9.092		VWS Sidem
EAU	Layyah	2006	1	36.368		VWS Sidem
India	Jamnagar	2007	4	24.000	TVC	IDE
Bahreín	Hidah	2007	10	27.300	TVC	VWS Sidem

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

La Tabla 10 muestra las instalaciones recientes de tecnología MED alrededor del mundo. Es posible observar que la mayoría de estas unidades están instaladas en los Emiratos Árabes Unidos; también se instalaron algunas unidades grandes en la refinera de petróleo de Jamnagar (India), con una capacidad de producción total superior a los 150.000 m<sup>3</sup> diarios. Se destaca el aumento de la capacidad de

producción de cada unidad a valores mayores a los 20.000 m<sup>3</sup>/día en las plantas más recientes. Adicionalmente, se puede apreciar que la mayoría de las plantas funcionan en acoplamiento con compresión térmica de vapor. Según Ettounei las plantas más recientes en Bahrén y los EAU sobresalen debido a que el desarrollo tecnológico ha permitido que la capacidad de las unidades incremente a valores entre los 27.000 y los 36.000 m<sup>3</sup>/día, generando, en el caso de la planta de Hidah, en Bahrén, una capacidad de producción total de agua dulce de 273.000 m<sup>3</sup>/día.<sup>105</sup>

**Gráfica 15.** Evolución de la capacidad de producción acumulada de las plantas MSF en los países del golfo pérsico



**Fuente:** MICALÉ, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

El incremento de la capacidad acumulada de producción del método MSF en los países del Golfo pérsico se puede observar en la Gráfica 15. Es notable el crecimiento acelerado de la capacidad de producción de los EAU, La característica más llamativa de estos datos es el rápido aumento de la capacidad de producción en los Emiratos Árabes Unidos, llegando al punto de superar la capacidad de producción de Arabia Saudita, país dominante por varios años en esta tecnología. En el 2008 la capacidad de producción de EAU mediante la destilación multi-etapa rondó los 4,9 millones de m<sup>3</sup> diario. En Kuwait, la tecnología dominante es la MSF, y su capacidad de desalinización es casi tres veces mayor que en estados como Omán o Qatar, donde se presentaron capacidades de producción total cercanas a 1,7 millones de m<sup>3</sup>/día en 2008. En Bahrén ocurre un caso particular, pues la

<sup>105</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 82. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.



ósmosis inversa cubre una porción importante (27%) en el mercado de la desalinización, principalmente en aguas extraídas de pozos salobres.

**Tabla 11.** Instalaciones MSF recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)

País	Localización	Año	Número de unidades	Capacidad por unidad (m <sup>3</sup> /día)	Temperatura operación (°C)	Rendimiento
EAU	Al Taweelah	1995	6	57.600	112	8
Bahréin	Al Hidd	1999	4	37.000	107-112	9
EAU	Ruwais	2001	2	15.000	105-112	6
EAU	Jebel Ali	2001	2	45.480	105	9
EAU	Jebel Ali 2	2003	3	60.530	105	8
EAU	Mirfa	2002	3	34.000	110	8,9
EAU	Umm Al NAr Station	2002	5	56.825	110	9
EAU	Fujairah	2003	5	56.750	110	9
Kuwait	Az Zour South	1999	12	32.731	110	8,8
EAU	Shuweithat	2004	6	75.670	111	9
Kuwait	Subyia	2007	12	56.825	110	9,5
Omán	Ras Laffan	2007	4	68.190	110	9,5
Omán	Sohar	2008	4	37.504	110	9,5
Arabia Saudita	Shoaiba	2009	12	73.645	110	9,5

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

La Tabla 11 muestra ejemplos de instalaciones MSF de desalinización recientemente construidas en los países del Medio oriente. Las capacidades de las unidades son notablemente mayores con respecto a las capacidades de las unidades MED, alcanzando valores en un rango entre los 50.000 y los 75.000 m<sup>3</sup>/día, y operando a temperaturas de 105°C a 112 °C. No obstante, el número de etapas y la relación de rendimiento se han mantenido con el pasar de los años, con 20-24 etapas y relaciones de rendimiento entre 8 y 10. La mayoría de las instalaciones han sido construidas por empresas italianas o coreanas, y se localizan en países del golfo pérsico. Una de las principales ventajas de las instalaciones MSF es que en algunos casos de han alcanzado capacidades de producción muy cercanas a 1 millón de m<sup>3</sup> diarios, por ejemplo las plantas de Shoaiba (880.000 m<sup>3</sup>/día), Jubail (947.890 m<sup>3</sup>/día) y Ras Al-Khair (1'025.000 m<sup>3</sup>/día), todas en Arabia Saudita<sup>106</sup>. Recientemente, se amplió la capacidad instalada de la planta de Fujarah<sup>107</sup>, aumentando su producción a 456.000 m<sup>3</sup>/día, siendo la planta de acoplamiento MSF-OI más grande del mundo.

<sup>106</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 84. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>107</sup> FÖRARE, Jonas & HENTHORNE, Lisa. Desalination: A Critical Element of Water Solutions for the 21st Century. [Google Academic]. 1ª ed. Estocolmo, SE: The Swedish Research Council Formas, 2009. p. 50. ISBN: 978-91-540-6034-4. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Tabla 12.** Instalaciones MVC recientes alrededor del mundo (Hasta 2009)

País	Localización	Año	Número de unidades	Capacidad por unidad (m <sup>3</sup> /día)	Fabricante
Cabo Verde	Praia	1995	2	1.250	IDE
Italia	Agrigento	1995	2	1.500	IDE
España	Bahía de Palma	1995	1	1.500	IDE
Chile	Antofagasta	1997	1	1.344	IDE
Arabia Saudita	Dammam	1997	1	1.242	Hadwaco
Australia	Freemantle	1998	1	1.800	IDE
Egipto	Abu Soma	1998	1	1.500	IDE
Grecia	Lavrion	1998	2	1.250	IDE
Italia	Sardinia	1998	6	2.880	IDE
Grecia	Atenas	1999	1	1.920	IDE
Guinea	Guinea	1999	2	1.363	Alfa Laval
Turkmenistan	Turkmenistan	1999	2	1.500	VWS Sidem
Chile	Antofagasta	2000	1	1.560	IDE
Turkmenistan	Turkmenbashi	2000	2	3.000	IDE
USA	California	2003	1	1.450	IDE
Argelia	Arzew	2004	1	1.440	VWS Sidem
Australia	Burup Penin	2004	3	1.200	VWS Sidem
China	Qingdao City	2004	1	3.000	
Kazajistán	Kazajistán	2005	1	1.100	GE Ionics
Perú	Moquegua	2005	2	1.320	IDE
India	Kudankulam	2006	4	2.560	IDE
Perú	Moquegua	2006	1	1.500	IDE

**Fuente:** Micale, G.; Cipollina, A. y Rizzuti, L. (2009). Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

Las plantas de compresión mecánica de vapor (MVC) se encuentran distribuidas en todos los continentes del planeta gracias a que su tamaño implica mayor facilidad de montaje, sin embargo, la planta de mayor capacidad de producción en la Tabla 12. es la de Sardinia (Italia), con 17.280 m<sup>3</sup>/día, lo que indica que su producción no es comparable ni siquiera con la capacidad de producción de una sola unidad MSF o MED. Se espera que el crecimiento de la capacidad de producción acumulada tenga un aumento mínimo debido a la falta de competitividad frente a los demás procesos de desalinización.

**Tabla 13.** Instalaciones OI recientes alrededor del mundo (Hasta 2012)

País	Localización	Año	Capacidad por unidad (m <sup>3</sup> /día)	Consumo energético (kWh/m <sup>3</sup> )	Fabricante
Israel	Ashkelon	2005	325.000	<4	IDE
Singapur	Tuas	2005	136.000	4,1	Hyflux
EAU	Fujairah	2003	170.000	3,8	Doosan
España	Carboneras	2005	120.000	4	Hydranautics
Arabia Saudita	Rabigh	2008	200.000	4	Mitsubishi
Chipre	Larnaka	2001	54.000	4,5	IDE
USA	Florida	1999	95.000	4	Stone and Webster – Poseidon
Argelia	Skikda	2004	100.000	3,65	

**Tabla 13.** (Continuación)

País	Localización	Año	Capacidad por unidad (m <sup>3</sup> /día)	Consumo energético (kWh/m <sup>3</sup> )	Fabricante
Argelia	Honaine	2005	200.000	3,5	
España	Águilas	2008	200.000	5,4	
Australia	Perth	2012	305.000	3,7	

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

La Tabla 13 muestra algunas de las plantas de ósmosis inversa más representativa a nivel mundial. Es importante ver la capacidad de producción de cada unidad, pues las magnitudes que se manejan son similares y competentes ante las técnicas térmicas. También lo descrito por Ettouney<sup>108</sup> es posible observar que las principales plantas ya no están ubicadas únicamente en los países del Medio oriente, sino que esta tecnología presenta una tendencia mucho más expansiva y globalizada.

## 4.2 EMPRESAS LÍDERES EN LA DESALINIZACIÓN

Existe un gran número de empresas dedicadas al tratamiento y la potabilización del agua. La mayoría son de carácter privado, y tienen que pasar por un proceso de adjudicación de contrato, el cual otorga el contrato a la mejor oferta. En otras ocasiones simplemente se contrata la empresa por fidelidad y confiabilidad. En la industria de la desalinización, los fabricantes suelen tener una amplia cobertura, que puede ir desde un país o región específica, hasta varios continentes. A continuación se presentan algunas de las principales empresas dedicadas a la fabricación de sistemas de desalinización.

- **IDE Technologies:** Es una empresa israelí líder mundial en el tratamiento de aguas. Se especializa en el desarrollo, construcción y operación de plantas de desalinización de última tecnología y avanzados sistemas de tratamiento de aguas industriales. Se encuentra en el mercado de la desalinización desde 1965. Ofrece plantas de desalación térmica y de membrana, tanto a escala pequeña como a escala industrial. Posee cerca de 400 plantas en más de 40 países, abasteciendo más de 3 millones de m<sup>3</sup> diarios de agua. Entre sus principales proyectos se encuentran la planta de ósmosis inversa más grande del mundo en Sorek (Israel), con una capacidad de 624.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de OI de Hadera (Israel) con una producción de 456.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Ashkelon (Israel) con 330.000 m<sup>3</sup>/día, la planta MED de Tianjin (China) con una producción de 100.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de VC de la Corporación de Energía Nuclear de India, en Kudankulam (India) con una

<sup>108</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 83. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

producción de 10.240 m<sup>3</sup>/día, y la planta de VC de Isla Guacolda (Chile) con una capacidad de 3.360 m<sup>3</sup>/día según los datos consiliados en el IDA<sup>109</sup> y en IDE technologies<sup>110</sup>.

**Imagen 14.** Planta de desalinización de ósmosis inversa de Sorek, Israel



**Fuente:** IDE Technologies. Proyecto Sorek. Disponible en: <http://www.ide-tech.com/es/case-study/sorek-israel-project-es/>

- ACWA Power<sup>111</sup>: Es una empresa privada de Arabia Saudita que se encarga de la producción de energía y agua desalinizada. Se encuentra en el mercado desde el 2002 y se especializa en la producción de agua desalinizada mediante el proceso de ósmosis inversa. Actualmente tiene presencia en más de 10 países, en regiones como el Medio Oriente, África del Norte y del Sur, y el Sudeste asiático. Sus plantas producen más de 2,7 millones de m<sup>3</sup>/día. Los proyectos más importantes son la planta de Shuaibah 3 (Arabia Saudita) con una capacidad de 250.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Shuaibah 1 (Arabia Saudita) con una producción de 150.000 m<sup>3</sup>/día y la planta de Salalah (Omán) con una producción de 120.000 m<sup>3</sup>/día. Aunque sus instalaciones no tienen grandes capacidades de producción, la empresa presta sus servicios al sector privado, por lo que por lo general, sus plantas, aunque son numerosas, son de pequeños tamaños.

---

<sup>109</sup> INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION. IDA Desalination Yearbook 2017-2018. [Google Academic]. 1ª ed. Oxford, GB: Media Analytics Ltd., 2018. p. 150. ISBN: 978-1-907467-52-3. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>110</sup> IDE TECHNOLOGIES. Desalinización. [Sitio web]. Kadima, IL. Soluciones. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.ide-tech.com/es/solutions/desalination-es/>

<sup>111</sup> ACWA POWER. Projects. [Sitio web]. Riad, SA. Assets. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.acwapower.com/en/projects/assets/>

• Veolia Water Solutions<sup>112</sup> (VWS) & Technologies Sidem: Es una empresa de origen francés y que a su vez es el mayor proveedor de servicios de agua en el mundo. Posee más de 100 años de experiencia en la desalinización de agua de mar y aguas salobres, y desde 1971 se ha centrado en la desalinización térmica. Veolia Water Technologies es el líder mundial en la implementación de estrategias de desalación con fines industriales y domésticos. En la actualidad, sus plantas tienen una capacidad de producción de más 13,13 millones de m<sup>3</sup> diarios, es decir, el 14% de la capacidad total instalada en el mundo, y se encuentran distribuidas en más de 108 países. Su principal producto es el desarrollo de plantas MED, aunque tampoco descuida la producción de agua desalada mediante ósmosis inversa. Entre sus principales proyectos de desalinización MED se encuentran la planta MED de Marafiq IWPP (Arabia Saudita) con una capacidad de 800.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Az Zour North IWPP (Kuwait) con una producción de 486.000 m<sup>3</sup>/día y la planta de Al Fujairah 2 (EAU) con una capacidad de 455.000 m<sup>3</sup>/día. En cuanto a los proyectos de ósmosis inversa, se destacan una planta en Ashkelon (Israel) que produce 392.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Sydeny Kurnell (Australia) con una producción de 250.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Basrah PQ (Irak) con una capacidad de 199.000 m<sup>3</sup>/día y la planta de Campo Dalías (España) con una producción diaria de 97.200 m<sup>3</sup>.

**Imagen 15.** Planta de Al Fujairah 2 en Emiratos Árabes Unidos



**Fuente:** Veolia Water Technologies. Líderes En Desalación De Agua De Mar y Salobre. Disponible en: <http://www.veoliawatertechnologies.es/Municipal/desalacion-de-agua-de-mar-y-salobre/>

• ACCIONA Agua<sup>113</sup>: Es una empresa española que contribuye al desarrollo sostenible en el sector del agua. Su objetivo principal es tratar, procesar, reutilizar, desalinizar y gestionar el agua para el uso doméstico e industrial. Tiene presencia en más de 25 países de los 5 continentes, y cuenta con más de 75 plantas de desalinización. La empresa posee una amplia trayectoria en la aplicación y el desarrollo de la desalinización mediante la ósmosis inversa. Sus principales

<sup>112</sup> VEOLIA WATER TECHNOLOGIES. Líderes En Desalación De Agua De Mar y Salobre. [Sitio web]. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. París, FR. Desalación. Disponible en: <http://www.veoliawatertechnologies.es/Municipal/desalacion-de-agua-de-mar-y-salobre/>

<sup>113</sup> ACCIONA AGUA. Tratamiento De Agua De Mar y Salobre (IDAM/IDAS). [Sitio web]. Madrid, ES. Áreas de actividad. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.accionagua.com/es/areas-de-actividad/dc-plantas-tratamiento-agua/tratamiento-de-agua-de-mar-y-salobre-idamidas/>

proyectos son la planta de Adelaida (Australia) con una producción de 300.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Beckton en Londres (Reino Unido) con una capacidad de 150.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Copiapó en Atacama (Chile) con una capacidad de producción de 51.840 m<sup>3</sup>/día, la de desalinización de Tampa bay (Estados Unidos) con una producción de 108.831 m<sup>3</sup>/día, y la planta de Umm Al Houl (Qatar) que produce 284.000 m<sup>3</sup>/día según estadísticas tomadas Del IDA<sup>114</sup>.

- Doosan<sup>115</sup>: Es una empresa coreana que funciona como uno de los principales proveedores de soluciones de agua. Maneja las tecnologías de desalinización MSF, MED y OI, ofreciendo una amplia gama de soluciones de alta eficiencia y en plazos de entrega cortos. La empresa ocupa el primer puesto en el mercado de planta desalinizadoras de gran escala, y desarrolló con éxito la primera planta híbrida del mundo, acoplando los métodos MSF y OI, en el proyecto de Fujairah en EAU, que a su vez es la planta con mayor capacidad de desalación del planeta. Sus principales instalaciones son la planta híbrida de Ras Al-Khair (EAU) con una capacidad de 1'036.490 m<sup>3</sup>/día, la planta MSF de Yanbu (Arabia Saudita) con una producción de 550.070 m<sup>3</sup>/día y la planta de MSF de Shuaibah en Jeddah (Arabia Saudita) con una producción de 881.920 m<sup>3</sup>/día.

- SUEZ<sup>116</sup>: Es una empresa pionera en el área de la desalinización mediante ósmosis inversa. Posee más de 45 años de experiencia y ha construido más de 250 plantas alrededor del mundo, suministrando más de 3'500.000 de m<sup>3</sup>/día de agua desalinizada a través de Degremont® y produciendo 1'500.000 m<sup>3</sup>/día a través de SUEZ. La empresa ofrece contratos DBO (Diseño, construcción y operación), lo que le permite construir y diseñar plantas personalizadas, pequeñas o grandes, para desalinizar agua de mar o aguas salobres. SUEZ busca incorporar tecnologías de energías renovables a los procesos de desalinización. Sus principales proyectos son la planta de Rosarito (México) que produce 380.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Melbourn (Australia) con una producción de 450.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Barcelona (España) con una capacidad de 200.000 m<sup>3</sup>/día, la planta de Al Dur (Bahréin) con una capacidad de 218.000 m<sup>3</sup>/día y la planta de Barka IV-IWP (Omán) con un producción de 280.000 m<sup>3</sup>/día.

---

<sup>114</sup> INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION. IDA Desalination Yearbook 2017-2018. [Google Academic]. 1ª ed. Oxford, GB: Media Analytics Ltd., 2018. p. 170. ISBN: 978-1-907467-52-3. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>115</sup> DOOSAN. Water Plants: Seawater Desalination Plants. [Sitio web]. Seúl, KR. Business areas. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.doosan.com/en/business/water-plants/seawater-desalination-plants/>

<sup>116</sup> INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION. IDA Desalination Yearbook 2017-2018. [Google Academic]. 1ª ed. Oxford, GB: Media Analytics Ltd., 2018. p. 177. ISBN: 978-1-907467-52-3. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

### 4.3 DESALINIZACIÓN EN COLOMBIA

En Colombia la desalinización es un proceso con poco desarrollo, aun cuando existen zonas con escasez hídrica por constantes sequías como la Guajira, o poblaciones que tienen un difícil acceso a agua potable como el departamento de San Andrés y Providencia. Sin embargo, algunas empresas privadas ubicadas en zonas en las que el agua dulce escasea o posee una calidad baja, han contratado empresas especializadas en la construcción y diseño de plantas de desalinización de pequeña escala, con el objetivo de cubrir las necesidades de sus empleados, o incluso de sus procesos industriales. A continuación, en la Tabla 14 se muestran algunas plantas de desalinización presentes en Colombia.

**Tabla 14.** Plantas de desalinización en Colombia

Planta	Año	Capacidad de producción (m <sup>3</sup> /día)	Tecnología de desalinización	Fabricante
Bodega	2017	4.704	OI	Aquatech international LLC
Pacífic Rubiales Energy, Puerto Gaitán	2012	79.500	OI	Tedagua
Barranquilla	2014	654	OI	GE Water & Process Technologies
Villavicencio	2012	908	EDI	GE Water & Process Technologies
Santander	2012	409	EDI	GE Water & Process Technologies
Villavicencio, Meta		1.890	OI	GE Water & Process Technologies
MCV Barranquilla	2014	3.120	OI	RWL Water
Mayagüez	2011	432	OI	RWL Water
Mayagüez	2010	545	OI	RWL Water

**Fuente:** Autor con información obtenida de: International Desalination Association. IDA Desalination Yearbook 2017-2018.

La Tabla 14 muestra el poco respaldo a la desalinización en un país con tan bastos recursos marinos y crisis hídricas como Colombia. La falta de apoyo económico a la ciencia e investigación hacen que la desalación de agua de mar no sea una prioridad. La mayoría de las plantas de desalinización existentes en el país se utilizan para disponer adecuadamente las aguas residuales de acuerdo a la normatividad vigente, es decir, el reducido uso que se le da al proceso de desalación no es para cubrir la demanda de agua de alguna comunidad, o cuando mucho, es para abastecer de agua a los empleados de compañías privadas. Las regiones de San Andrés y la Guajira son susceptibles a la escasez de agua potable, por lo que sería una alternativa viable para la comunidad abastecerse mediante la desalinización, sin embargo, sin apoyo económico para la desarrollar el proceso internamente, la alternativa corre el riesgo de volverse insostenible, pues importar los equipos resultaría muy costoso para el mercado colombiano.

## 5. FACTORES LIMITANTES DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN

Para determinar la viabilidad de la implementación de un proceso de desalinización en una determinada región o país, es necesario evaluar factores de diseño determinantes y que expanden el concepto de la desalinización a algo más que los equipos y principios que se utilizan.

### 5.1 IMPACTO AMBIENTAL

Para el diseño y construcción de las instalaciones de un proceso de desalación es importante elaborar una evaluación de impactos ambientales, así como un plan de mitigación que permita el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente del país o región en donde se llevará a cabo el proyecto.

La investigación entre Arreguin y Martin<sup>117</sup> detectó gran diversidad de impactos ambientales que se pueden generar tanto en la construcción como en la operación de las plantas de desalinización. Los impactos pueden variar de acuerdo al origen del agua de alimentación o a la ubicación de la planta, sin embargo, es común que los planes de mitigación sean muy similares tanto para la explotación de agua de mar como la explotación de aguas salobres.

Según los avances de la desalinización en agua de mar<sup>118</sup> un proceso de desalinización debe caracterizarse por ser ambientalmente sostenible, y tiene que contemplar los impactos ambientales que puede causar cualquier tecnología del proceso, ya sea en su uso o en su desarrollo. Proteger el medio ambiente mientras que simultáneamente se explota un recurso que es hogar de una gran diversidad de fauna, flora y procesos ecológicos, es un objetivo de investigación y desarrollo de vital importancia para alcanzar la mayor viabilidad posible del proceso de desalación. Para realizar la evaluación ambiental adecuada al proceso, es necesario tener claras las posibles mejoras que puede tener la técnica de desalinización implementada, a largo y a corto plazo, especialmente en todos los aspectos relacionados a los efluentes producidos por la planta.

Es común que al referirse al proceso de desalinización, las personas piensen que es una alternativa limpia para el abastecimiento de agua potable, sin embargo es una opción que como muchas otras, puede traer consigo impactos ambientales potenciales similares a los de cualquier otra industria. Problemas redondos como la modificación de los ecosistemas, las emisiones de compuestos dañinos para el

---

<sup>117</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 27. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

<sup>118</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 53. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.



medio ambiente, la explotación de recursos no renovables o la contaminación por medio de efluentes de ambientes marinos y terrestres, son situaciones que lamentablemente también pueden ser producidas por una operación inadecuada de las tecnologías de desalación. Actualmente, llama la atención el aumento de la salinidad de los mares en algunas regiones como el Golfo pérsico, el Mar Rojo, el Mar Mediterráneo o las costas de California debido a la expansión de los procesos de desalinización.<sup>119</sup>

La cantidad de plantas de desalinización en todo el mundo cada vez es mayor, y mientras que la escasez de agua potable sea más aguda, las tecnologías evolucionaran con mayor rapidez y los costos unitarios se reducirán. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha formulado directrices rigurosas tanto para la calidad del agua desalada como para la protección del medio ambiente. Lo anterior es para contribuir con la optimización de las plantas de desalación existentes o en planos, permitir que las personas puedan acceder a los beneficios del agua desalada, y garantizar la calidad, protección y seguridad del medio ambiente. Para Shatat y Riffat<sup>120</sup> el proceso de desalinización no solo consiste en el método usado para la separación de la sal del agua, sino que va desde la explotación del recurso marino hasta la ingesta o el uso final que se le dé, por lo que todo el proceso debe adaptarse a las condiciones específicas del sitio en donde se lleva a cabo cada etapa. Los elementos ambientales son incluso más importantes que los detalles comerciales, y deben ser considerados como un factor de diseño del procedimiento.

Cumplir con la normatividad permite evitar multas económicas y restricciones de operación que puede causar pérdidas monetarias notables en la planta. En seguida se mostraran los principales impactos ambientales así como sus medidas de mitigación.

**5.1.1 Impacto de las descargas al medio ambiente.** Los desechos de las instalaciones de desalinización dependen directamente de la técnica adoptada, la calidad del agua de alimentación, los requisitos que debe tener el agua producto, los sistemas de pretratamiento y post-tratamiento y la forma como se realiza limpieza y mantenimiento a los equipos. En algunas etapas del proceso, como en la limpieza de equipos, pretratamiento o post-tratamiento del agua, suelen utilizarse químicos como el cloro y sus derivados, los cuales tienen una alta nocividad para la salud de la vida marina.

---

<sup>119</sup> DAWOUD, Mohamed & AL MULLA, Mohamed. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. [Science Target]. Dubai, AE: International Journal of Environment and Sustainability, 2012. Vol. 1, No. 3, p. 27. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>120</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 8. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

Algunas de las características (Tabla 15.) que puede poseer una corriente de salida de una planta desalinizadora son:

- Concentraciones de SDT entre 46.000 y 80.000 ppm para las plantas que desalinizan agua procedente del mar.
- Incrementos de hasta 15°C por encima de la temperatura del mar.
- Niveles de turbidez mayores a los de la corriente de alimentación.
- Niveles de oxígeno disuelto menores a los de la corriente de alimentación, especialmente en plantas de desalinización térmica.
- Presencia de compuestos químicos (cloruros, dióxido de carbono, sulfuros, polímeros, etc.) utilizados en los procesos de pretratamiento y post-tratamiento.
- Presencia de compuestos químicos (compuestos de cloro y de sodio, ácido cítrico, sulfato de sodio, etc.) procedentes de los procedimientos de limpieza de tuberías, instrumentos y membranas, especialmente en los procesos de desalación por membranas.
- Presencia de compuestos orgánicos o metales que ingresaron al proceso conjuntamente con la corriente de alimentación.<sup>121</sup>

**Tabla 15.** Características de la corriente de salmuera de diferentes plantas en países del GCC

Parámetro	Abu-fintas-Qatar (Agua de mar)	Ajman (OI de aguas salobres)	Um Quwain (OI de aguas salobres)	Qidfa I - Fujairah (OI de aguas salobres)	Quifa II - Fujairah (Agua de mar)
Temperatura (°C)	40	30,6	32,5	32,2	29,10
pH	8,2	7,5	6,7	6,97	7,99
EC	No reporta	16,5	11,3	77,0	79,6
Ca (ppm)	1.350	312	173	631	631
Mg (ppm)	7.600	413	282	2.025	2.096
Na (ppm)	No reporta	2.759	2.315	17.295	18.293
HCO <sub>3</sub> (ppm)	3.900	561	570	159	149,5
SO <sub>4</sub> (ppm)	3.900	1.500	2.175	4.200	4.800
Cl (ppm)	29.000	4.572	2.762	30.487	31.905
TDS (ppm)	52.000	10.114	8.275	54.795	57.935
Dureza total (ppm)	No reporta	No reporta	32	198	207
Cl <sub>2</sub> libre (ppm)	Trazas	No reporta	0,01	No reporta	No reporta
SiO <sub>2</sub> (ppm)	No reporta	23,7	145	1,02	17,6

**Fuente:** DAWOUD, M. y AL MULLA, M. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study.

Cuando los residuos de las plantas desalinizadoras se disponen en tierra firme, se debe evitar que la salmuera se filtre a través del suelo, debido a que incrementa la

<sup>121</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 31. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

posibilidad de contaminar acuíferos de agua dulce o puede salinizar y solidificar el suelo, inhibiendo el crecimiento de cultivos y plantas en la zona.

Por otra parte, cuando las descargas se realizan en el mar se puede dar lugar a varios daños ambientales debido a la calidad, cantidad, forma de disposición y dilución de la salmuera. La salmuera es una solución más densa que el agua de mar, por lo que es posible que se deposite en el mismo lugar donde se dispone, afectando a las comunidades bentónicas, y, si hay presencia de metales pesados, es posible que estos se depositen en el fondo oceánico afectando la salud de los huevos de los organismos, las larvas de diversas especies y el plancton.

En otras situaciones, la corriente de salmuera lleva consigo material fino de suspensión, que al llegar al mar puede obstaculizar el paso de la luz solar, reduciendo la actividad marina y afectando organismos como el fitoplancton. Lo anterior depende de las corrientes marinas y el oleaje de la zona, sin embargo, al depositarse en el lugar de disposición se puede afectar la ecología local por el aumento en los niveles de salinidad y la temperatura del agua de mar, afectando e incluso matando a los organismos que habitan las zonas cercanas a las obras de descarga. También es posible que las rutas de migración cercanas a la costa de algunos peces se vean afectadas, debido a que los organismos pueden preferir alejarse de la zona de influencia de las descargas, alejándose de la costa y exponiéndose más a sus depredadores<sup>122</sup>. Una gran variedad de organismos pueden adaptarse temporalmente a determinadas condiciones de salinidad y temperatura, pero al ser sometidas a condiciones extremas y desfavorables, la abundancia de fauna y flora se verá afectada, y en algunas ocasiones, los cambios del ecosistema pueden atraer a otros organismos no comunes en la zona bajo las condiciones normales.

Los impactos en el medio marino<sup>123</sup> se potencializan cuando las descargas de agua residual coincide con ecosistemas de alta sensibilidad. La magnitud del impacto dependerá tanto de las características fisicoquímicas de la corriente de rechazo del proceso de desalación como de las condiciones hidrográficas y biológicas del ecosistema que recibe la descarga. Los lugares cerrados y de baja profundidad, con abundante vida marina, son susceptibles a impactos más fuertes sobre la salud del ecosistema, mientras que lugares abiertos como el mar, tienen mayor facilidad para dispersar las corrientes de desecho.

---

<sup>122</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 36. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

<sup>123</sup> DAWOUD, Mohamed & AL MULLA, Mohamed. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. [Science Target]. Dubai, AE: International Journal of Environment and Sustainability, 2012. Vol. 1, No. 3, p. 30. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

Las acciones para mitigar estos impactos bajo los principios de Arreguin y Martin<sup>124</sup> son:

- Ubicar las zonas de descarga en un sector que no afecte críticamente a las comunidades ecológicas.
- Diluir adecuadamente la corriente de salmuera para reducir el impacto en la salud de las especies marinas. Las plantas desalinizadoras suelen mezclar la corriente de salmuera con corrientes de agua de sistemas de enfriamiento, o corrientes provenientes de los sistemas de pretratamiento, post-tratamiento o limpieza, logrando la reducción de la concentración de sales y otros compuestos de la corriente, y disminuyendo notablemente la temperatura de la salmuera.
- Utilizar pretratamientos rigurosos para reducir considerablemente el uso de sustancias peligrosas en las plantas de desalinización.
- Realizar un análisis que permita identificar el sitio más adecuado para la disposición de los residuos, incluyendo lugares en tierra firme.
- Mantener un control riguroso sobre los recubrimientos de las lagunas de evaporación utilizadas para la disposición de salmuera en tierra firme, para evitar filtraciones a través del suelo. Esta vía de disposición se debe llevar a cabo en zonas de poca precipitación y donde la tierra sea económica.
- Realizar estudio hidrogeoquímicos a la hora de excavar un pozo profundo para la disposición de residuos en tierra firme, con el objetivo de garantizar la no contaminación de acuíferos.
- Utilizar materiales de construcción con baja susceptibilidad a problemas de corrosión para reducir el uso de químicos anticorrosivos.
- Descargar los residuos en tiempos en los que las comunidades marinas se vean menos afectadas.

**5.1.2 Impacto de las obras de toma en el ambiente marino.** El proceso de extracción del agua de mar hacia la planta de desalinización impacta el ambiente marino atrapando especies marinas en las rejillas y filtros, y en algunos casos procesándolos, situación que por lo general provoca la muerte del organismo. Las plantas de grandes dimensiones pueden afectar las corrientes marinas.

---

<sup>124</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 40. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

Las medidas de mitigación para los impactos causados por las obras según Arreguin y Martin<sup>125</sup> son:

- Ubicar las zonas de toma de agua de mar en un sector que no afecte críticamente a las comunidades ecológicas.
- En las zonas de toma de agua de mar se deben propiciar velocidades bajas en los canales para reducir la captura accidental de especies marinas en las pantallas de entrada, lo que conlleva a reducir su procesamiento en la planta, y facilitar las condiciones de operación del proceso.
- Utilizar pozos de filtración para la toma de agua, reduciendo considerablemente la entrada de especies marinas a la planta.

**5.1.3 Impacto causado durante la construcción de la planta.** La construcción de una planta desalinizadora lleva consigo la construcción simultánea de sistemas de pretratamiento, post-tratamiento y cogeneración energética. Estas construcciones pueden causar la emisión de humos y polvos, la contaminación auditiva por exceso de ruido, la afectación a la playa, los daños al hábitat de aves, mamíferos, peces y flora; la erosión que implica la obra, y la obstrucción de la obra a las actividades recreativas y productivas del hombre en la playa. Se debe tener un control estricto sobre las líneas de transporte del agua de mar a la planta de desalinización, y del agua producto al lugar donde será distribuida; así mismo se debe prestar atención a las líneas de conducción eléctrica. Las anteriores recomendaciones son válidas también para instalaciones de desalinización ubicadas en sectores más alejados de las costas, es decir, de aguas salobres.

Para mitigar estos impactos Arreguin y Martin <sup>126</sup> recomiendan:

- Considerar lineamientos ordenados en la reglamentación de construcción de la zona, como cercas, eliminadores de humos y ruidos, y garantizar la protección y seguridad de zonas habitadas, hoteleras o recreacionales, y sus accesos.
- Reducir la longitud y el número de líneas de conducción de agua y de electricidad.
- Identificar la ubicación adecuada para la planta, logrando que su afectación a las actividades productivas y recreacionales sea mínima.
- Aprovechar aquellas zonas donde ya existen líneas de abastecimiento de agua y energía, por ejemplo, hidroeléctricas, termoeléctricas, puertos, etc.

---

<sup>125</sup> *Ibíd.*, p. 41.

<sup>126</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 41. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

**5.1.4 Impacto por el creciente consumo energético.** Es bien sabido que una de las principales características de una planta de desalinización es su elevado consumo energético, especialmente aquellas con procesos térmicos. Los efectos secundarios del elevado consumo energético de este tipo de instalaciones son el transporte del combustible (gas o petróleo), el aumento de la temperatura del agua del mar generado por los sistemas de enfriamiento de las plantas termoeléctricas productoras de energía, o la captura accidental de organismos en el proceso de extracción de agua para las plantas generadoras.

Las medidas de mitigación del consumo energético según Arreguin y Martin<sup>127</sup> son:

- Uso eficiente de energía. En cualquier proyecto de desalinización es necesario incluir un plan de conservación energética y reducción del consumo.
- Aplicar la cogeneración, la cual consiste en la obtención y el aprovechamiento, simultáneamente, de energía eléctrica y térmica, aumentando notablemente la eficiencia energética de la planta. Algunos procesos de desalinización son autosuficientes y utilizan energía sobrante de alguna etapa del proceso, para reducir la presión o aumentar la temperatura en otra etapa, como es el caso de los procesos térmicos.
- Acoplamiento de sistemas de energía renovable como energía solar o energía eólica, al menos para procesar pequeñas cantidades de agua.

**5.1.5 Impacto en la calidad del aire.** Las instalaciones de desalinización suelen emitir importantes cantidades de oxígeno, nitrógeno, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, a través de sus sistemas de pretratamiento y post-tratamiento, gracias a la acción de los equipos de aireación y desgasificación. Cuando la planta funciona bajo un modelo de cogeneración, también deben considerarse las emisiones de una planta termoeléctrica común. Los niveles de dióxido de azufre varían dependiendo de la fuente de combustible que se utilice, petróleo o gas natural, y las cantidades de óxidos de nitrógeno han disminuido notablemente debido a las innovaciones tecnológicas.

---

<sup>127</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 42. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

**Tabla 16.** Emisiones de CO2 (Millones de m3) de efecto invernadero de países del GCC

Año	Bahréin	Arabia Saudita	EAU	Kuwait	Qatar	Omán
1996	15,6	248,9	103,0	49,1	30,9	14,5
1997	18,3	254	111	52	32	17,8
1998	19,1	256,8	116	56	33,2	21,7
1999	20,2	262,7	117	60	31	20,4
2000	20,3	289,3	109	59	34,5	21,6
2001	20,7	299,9	118	60	27,4	22,1
2002	21,6	309,6	125	55	29,13	22,8
2003	22,3	344,7	126	63	32,35	22,5
2004	23,0	385,7	132	67	38,48	24,2
2005	25,2	415,4	137,8	76,7	53,5	29,7
2006	26	433	141	79	56	31
2007	27,1	452	145	82	58	33
2008	28	470	149	85	61	34
2009	29	489	153	88	63	36
2010	30	507	157	92	66	38

**Fuente:** DAWOUD, M. y AL MULLA, M. <sup>128</sup> Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study.

Es importante recalcar que la industria de la producción del agua es la segunda que más dióxido de carbono emite en los países del Golfo Pérsico, después del sector petrolero, y por lo tanto es una de las principales contribuidoras al cambio climático tal y como se puede observar en la Tabla 16.

Según Arreguin y Martin<sup>129</sup> las medidas de mitigación para este impacto son:

- Uso eficiente de energía.
- Acoplar sistemas de energía renovable como la energía solar o la eólica.

**5.1.6 Impacto sobre el crecimiento poblacional.** La construcción de las instalaciones desalinizadoras lleva consigo asentamientos humanos en zonas que no están dispuestas para habitar. Las nuevas poblaciones pueden perjudicar planes de desarrollo regional tanto a largo como a corto plazo, así como pueden ampliar la zona de influencia de la planta, perjudicando ecosistemas cercanos.

---

<sup>128</sup> DAWOUD, Mohamed & AL MULLA, Mohamed. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. [Science Target]. Dubai, AE: International Journal of Environment and Sustainability, 2012. Vol. 1, No. 3, p. 31. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>129</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 42. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

Según Arreguin y Martin<sup>130</sup> las medidas de mitigación para reducir los impactos del crecimiento poblacional son:

- Introducir el proyecto en los planes de desarrollo regional.
- Limitar las dimensiones de la planta para que cubra las necesidades específicas que llevaron a su construcción. No modificar la zona de influencia con el pasar del tiempo, a menos que así este planeado.
- Localizar la planta en una zona con fácil acceso a fuentes de energía y redes de distribución.
- Ubicar la instalación cerca de las zonas de extracción del agua de mar.

**5.1.7 Otros impactos.** Al ser un proceso que aún se encuentra en desarrollo, con instalaciones que abarcan un área importante y que explotan un recurso de gran importancia ecológica, existe una gran diversidad de impactos. Los derrames accidentales de sustancias tóxicas y peligrosas pueden poner en riesgo la salud del ecosistema. La pesca comercial y la navegación se ven afectadas durante la construcción y operación de la planta, en especial en las etapas de extracción y descarga, además de la generación de ruido que implica el uso del sistema de bombeo. La planta puede generar un impacto visual negativo, en especial para la industria hotelera. En algunas ocasiones las grasas y aceites pueden afectar el proceso de desalinización.

Las acciones de mitigación ante todos los impactos anteriormente mencionados se citan a continuación<sup>131</sup>:

- Realizar capacitaciones al personal de operación. Se deben implementar sistemas de aseguramiento de calidad y de seguridad que permitan detectar fugas y alarmas.
- Ubicar boyas en aquellas zonas próximas a los sitios de toma y descarga.
- Hacer publicidad a las zonas recreacionales temporales, colocando anuncios y vías de acceso alternas mientras se realiza la construcción de la planta.
- Desarrollar un diseño arquitectónico que no genere un impacto visual importante en las zonas hoteleras.
- Implementar instrumentos para la reducción del ruido causado por el desarrollo y operación de la planta desalinizadora.
- Inspeccionar y confirmar la ausencia de contaminantes como grasas y aceites en las inmediaciones de las zonas de extracción de agua.

---

<sup>130</sup> *Ibíd.*, p. 43.

<sup>131</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 43. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.



**Cuadro 3.** Principales impactos ambientales y acciones de mitigación del proceso de desalinización

Riesgo	Impactos potenciales	Acciones de mitigación
Descarga de salmuera	Incremento de la salinidad	- Dilución de la salmuera con agua de mar o agua de enfriamiento. - Recolección de agua con salmuera
	Incremento de la temperatura	- Dilución de la salmuera con agua de mar o agua de enfriamiento.
Contaminación del aire	Emisión de NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub>	- Usar gas natural. - Usar fuentes de energía renovables.
Ruido	La construcción y operación de las plantas de desalinización genera un aumento en los niveles de ruido alrededor de la ubicación	- Los niveles de ruido en la mayoría de los casos de plantas de desalinización no exceden el límite de nivel de ruido "normalmente aceptable" de 65 dB. Entonces, no se requieren medidas de mitigación.
Uso y planificación del suelo	La mayoría de las plantas de desalinización se encuentra en la costa del mar, donde el valor de la tierra es muy alto	- Selección adecuada de sitios para minimizar y compensar la pérdida de esta tierra de espacio abierto.

**Fuente:** DAWOUD, M. y AL MULLA, M. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study.

En el Cuadro 3 se describen los principales riesgos, impactos ambientales y acciones de mitigación que conlleva la construcción y operación de una planta de desalinización resumiendo lo presentado en la subsección 5.1.

## 5.2 ECONOMÍA

La desalinización ha adquirido una importancia fundamental desde finales de la década de 1950, cuando el petróleo tenía un precio cercano a los 3 USD/Barril. Para lograr que el proceso de desalinización de agua de mar fuera viable se tuvieron que estudiar y diseñar diferentes sistemas que minimizaran los costos productivos del agua desalada. Técnicas térmicas como la destilación multi-etapa y multi-efecto y la compresión de vapor fueron las primeras en ser desarrolladas. Otros procesos, como los de membrana, tardaron un poco más en desarrollarse y en alcanzar resultados que les brindaran una mayor competitividad en el mercado.

Al equilibrar los costos de los recursos usados para alimentar el proceso, así como los usados para construir los equipos, las tecnologías que más se vieron favorecidas

fueron aquellas que poseían una eficiencia moderada. En los años 60, la técnica MSF, al funcionar en cogeneración, tenía una temperatura de operación cercana a los 80°C, funcionaba con 8-12 etapas, y generaba agua desalada con un costo de 0,3 USD/m<sup>3</sup>. Es importante recalcar que en esa época las restricciones y multas ambientales eran escasas.

El precio del petróleo afectó directamente el funcionamiento y las utilidades de los procesos MSF. Cuando el costo del petróleo alcanzó los 25 USD/Barril, la cantidad de etapas aumentó casi hasta 20, y el costo de producción del agua desalinizada incrementó hasta 1USD/m<sup>3</sup> aproximadamente. Adicionalmente, empezó a aparecer la conciencia ambiental debido al aumento de las emisiones de dióxido de carbono.

Según Barak<sup>132</sup> en la actualidad, los procesos de desalinización deben enfrentarse a la incertidumbre en los precios del petróleo, así como las amenazas ambientales que contribuyen al cambio climático, en especial el aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>. Lo anterior genera más dificultades a la hora de diseñar un sistema de desalinización o plantas de producción de energía. Es necesario acelerar las investigaciones e impulsar los avances tecnológicos que permitan obtener procesos de alta eficiencia a un bajo costo, de lo contrario, tendrán que utilizarse medidas estrictas para lograr la conservación del agua dulce, como la reducción de la demanda o racionamientos indeseables.

Los avances y el continuo estudio de los procesos de desalación han logrado disminuir los costos de producción del agua, sin embargo, los estrictos estándares de calidad requeridos para el consumo del recurso han hecho que se tengan que utilizar sistemas de pretratamiento y post-tratamiento más rigurosos, y por consiguiente se han incrementado los costos del proceso.

Hoy en día, predominan dos tecnologías desde el punto de vista comercial, la MSF y la OI<sup>133</sup>. Para determinar cuál es la mejor alternativa se deben tener en cuenta una gran variedad de consideraciones, en especial desde el punto de vista económico y técnico. A pesar de todas las limitaciones a las que debe enfrentarse el proceso, se debe destacar que en algunas plantas los costos de la desalinización son relativamente bajos, en especial para técnicas que utilizan energía moderadamente, es decir los procesos de membrana. A continuación se detallará más información acerca de los factores influyentes en la economía de un proceso de desalación, y se describirá la situación actual de las diferentes tecnologías.

---

<sup>132</sup> BARAK, Amitzur. Economic Aspects of Water Desalination. . [Google Academic]. Advances in Water Desalination. 1ª ed. New Jersey, US: John Wiley & Sons, Inc., 2013. p. 687. [Consultado el 22 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>133</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinayah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 58. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**5.2.1 Factores que afectan la economía de la desalinización.** La economía de las tecnologías de desalinización se ve fuertemente influenciada por los siguientes factores:

- **Condiciones del sitio de instalación de la planta:** Características como la ubicación, la topografía, las vías de acceso, la accesibilidad y cercanía a fuentes energéticas, la elección de sitios adecuados para los sistemas de pretratamiento y post-tratamiento, y la adecuada ubicación de los depósitos de salmuera y las zonas de alimentación al proceso de agua de mar. Tener pleno conocimiento de los factores anteriormente mencionados y seguir las recomendaciones en referencia a la ubicación y extensión de la planta puede reducir los costos asociados al transporte, alimentación de agua y disposición de la salmuera.
- **Capacidad de la planta:** Existe una relación inversa entre la capacidad de producción de la planta y el costo unitario del producto. A medida que la capacidad de producción de la instalación aumenta, el costo del producto disminuirá. También es importante tener en cuenta que al seguir este principio, el costo de capital inicial será mayor, siguiendo el modelo de “economías de escala”. Las plantas pequeñas tienen costos menores de inversión y de operación que las plantas grandes, sin embargo su productividad será menor.
- **Operación y mantenimiento:** Se debe disponer de operadores, ingenieros y personal administrativo calificados, capaces y eficientes que incrementen la capacidad de producción de la planta y reduzcan los tiempos de inactividad del proceso. El costo asociado a reactivos, membranas, filtros, instrumentos de limpieza, mano de obra, etc. dependerá de las buenas prácticas de operación, y por lo general varía entre las diferentes plantas.
- **Calidad del agua de alimentación:** Si el agua posee un contenido bajo de contaminantes y salinidad, la energía necesaria para lograr su desalinización será menor, adicionalmente, se podrán suprimir métodos de pretratamiento y post-tratamiento disminuyendo los costos de inversión.
- **Calidad del agua producida:** Los estándares de calidad que debe cumplir el agua producida dependerán de su uso final. A medida que los parámetros de calidad son más estrictos, los procesos de pretratamiento y post-tratamiento deberán ser más rigurosos, y por lo tanto más costosos.
- **Costos de energía:** De acuerdo al tipo de tecnología de desalación, se demandarán diferentes tipos y cantidades de energía. Adicionalmente, la disponibilidad y fácil acceso a las fuentes de energía es esencial para que el costo

del producto no se vea afectado drásticamente. Las plantas de cogeneración son una alternativa viable para disminuir los costos asociados al consumo energético.

- **Vida útil y amortización:** A medida que se incrementa la vida útil de la planta, los costos de capital se reducen y por lo tanto también disminuye el costo unitario del producto.
- **Tecnología de desalinización:** El costo de cada técnica puede variar enormemente en relación con los demás procesos. Cada tecnología varía en cuanto a sus equipos, capacidades de producción, técnicas de mantenimiento, extensión, etc.

Por todos los factores anteriormente mencionados en esta sección, la estimación del costo del agua desalada no puede generalizarse<sup>134</sup>. Los costos del proceso de desalinización varían en rangos muy amplios, presentándose situaciones en las que una planta puede tener un costo 250 veces mayor al de las plantas más económicas según lo investigado por Arreguin y Martín.<sup>135</sup>

**5.2.2 Economía de la desalinización térmica.** El costo de los procesos de desalación térmicos se puede estimar usando relaciones simples que se basan en valores de costo específicos. Para que la estimación tenga confiabilidad es necesario seleccionar cuidadosamente los datos del modelo, y que estos sean recientes, reflejando la actualidad de la industria de la desalinización.

Si se quiere hacer un estudio económico más detallado se debe dar solución a las ecuaciones del balance energético del proceso, para lograr determinar las exigencias energéticas (vapor de calentamiento y energía eléctrica), caudales, medidas de las etapas y las áreas efectivas de transferencia de calor. Al ajustar este modelo con los valores específicos del costo de la energía eléctrica, vapor de calentamiento, equipos de transferencia de calor, el sistema de bombeo, entre otras consideraciones, se puede determinar el costo unitario del producto.<sup>136</sup>

---

<sup>134</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 103. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>135</sup> ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 44. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

<sup>136</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 105. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

**Tabla 17.** Parámetros para la determinación del costo unitario del producto en los procesos de desalinización térmicos

<b>PROCESO</b>	<b>MED</b>	<b>MSF</b>	<b>MVC</b>
Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	30.000	50.000	5.000
Factor de rendimiento	0,9	0,9	0,9
Tasa de interés	0,05	0,05	0,05
Vida útil de la planta (años)	40	40	40
Costo de capital específico (USD/(m <sup>3</sup> /día))	951	878	1.100
Factor de amortización (por año)	0,05827	0,05827	0,05827
Costo de energía eléctrica (USD/kWh)	0,05	0,05	0,05
Consumo de energía eléctrica (kWh/m <sup>3</sup> )	1,5	3	14
Costo específico de trabajo (USD/m <sup>3</sup> )	0,01	0,01	0,01
Costo específico químico (USD/m <sup>3</sup> )	0,04	0,06	0,04
Piezas de repuesto (% del costo de capital)	0,01	0,01	0,01
Pérdidas de energía eléctrica (kWh/m <sup>3</sup> )	10	10	-
Costo unitario de las pérdidas energéticas (USD/kWh)	0,03	0,03	-
Capital (*1000 USD/año)	28.530	43.900	5.500
Amortización anual (*1000 USD/año)	1.662	2.558	320
Costo anual de piezas de repuesto (*1000 USD/año)	285	439	55
Costo específico energético (USD/m <sup>3</sup> )	0,075	0,15	0,7
Costos específico de pérdidas energéticas (USD/m <sup>3</sup> )	0,3	0,3	-
<b>Costo unitario del producto (USD/m<sup>3</sup>)</b>	<b>0,622</b>	<b>0,702</b>	<b>0,978</b>

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

La Tabla 17 muestra el cálculo de los costos unitario de producto para cada uno de los procesos de desalinización térmicos. Se puede observar que el factor de mayor influencia es el costo de capital específico, con valores cercanos a 1.000 USD/(m<sup>3</sup>.día). Los datos utilizados para los procesos MSF y MED fueron tomados de un estudio desarrollado por Borsani y Rebagliati en el 2005<sup>137</sup>.

Los costos unitarios del producto mostrados en la Tabla 17 tienen coherencia con los datos publicados en la actualidad. El proceso de compresión de vapor es más

<sup>137</sup> BORSANI, Roberto & REBAGLIATI, Silvio. Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies. [Elsevier Science Publishers]. Genova, IT: Desalination, 10 de Marzo del 2005. Vol. 182, No. 1, p. 31. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 22 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

costoso debido a la diferencia en la capacidad de producción de la planta con respecto a las otras tecnologías.<sup>138</sup>

Las instalaciones de desalación térmicas se operan bajo el uso de combustibles fósiles, lo cual incrementa el costo de producción del agua desalada, poniendo en riesgo la viabilidad económica del proceso. La tabla 18 muestra los diferentes costos que se pueden presentar en las diferentes tecnologías de desalinización de acuerdo a la capacidad de producción de la planta. Los valores coinciden con los descritos en la Tabla 17 a excepción de la tecnología de compresión de vapor, debido a que la capacidad de producción mostrada anteriormente es demasiado grande (5.000 m<sup>3</sup>/día) para una planta de VC en la actualidad.

**Tabla 18.** Costo unitario del agua desalinizada mediante procesos térmicos

Proceso de desalinización	Capacidad de desalación de la planta (m <sup>3</sup> /día)	Costo unitario de producto (USD/m <sup>3</sup> )
	<100	2,5-10
Destilación multi.efecto (MED)	12.000-55.000	0,95-1,95
	>91.000	0,52-1,01
Destilación multi-etapa (MSF)	23.000-528.000	0,52-1,75
Compresión de vapor (VC)	1.000-1.200	2,01-2,66

**Fuente:** SHATAT, M. y RIFFAT, S. <sup>139</sup> Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.

En la Tabla 18 en cuanto al proceso MED se pueden observar costos de producción unitarios muy altos, por lo que no es recomendable utilizar instalaciones MED con capacidades de producción tan pequeñas. Cuando las capacidades de producción de los sistemas de destilación multi-efecto son mayores a 12.000 m<sup>3</sup>/día los costos empiezan a adquirir competitividad en el mercado. La técnica MSF es un poco más genérica, en parte porque sin importar el tamaño de las plantas, el proceso seguirá consumiendo altas cantidades de energía; la ventaja del precio de producción unitario de MSF (0,52-1,75 USD/m<sup>3</sup>) es su competitividad frente a los demás procesos en un rango de capacidades muy amplio. Los sistemas de compresión de vapor son procesos poco utilizados actualmente debido a que el producto obtenido posee un precio unitario muy elevado influenciado por la poca capacidad de producción de las instalaciones.

<sup>138</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 106. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>139</sup> SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 9. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**5.2.3 Economía de la desalinización por membrana.** Las técnicas de desalinización por membrana han evolucionado constantemente, disminuyendo su costo hasta el punto en que se han convertido en la técnica dominante a nivel mundial, despreciando la importancia de los crecientes precios de la energía. Los recientes avances en la composición y propiedades de las membranas, los sistemas de bombeo y los sistemas de recuperación de energía, han hecho que el proceso sea viable y eficiente.

Los costos unitarios del agua desalada por procesos de membrana también pueden obtenerse mediante el mismo modelo usado para hallar el valor de costo de producción de los procesos térmicos. En este caso, el procedimiento se realiza solo para la ósmosis inversa, y se deben tener en cuenta la confiabilidad de la información, la fuente de alimentación del agua que se va a desalar (de mar o salobre), y los costos asociados a procesos de pretratamiento y post-tratamiento. En el caso de los costos de inversión, una planta de OI de aguas salobres puede alcanzar valores entre los 300 y los 600 USD/(m<sup>3</sup>/día), mientras que una planta de OI que desala agua de mar puede tener costos de inversión hasta de 1.100 USD/(m<sup>3</sup>/día) según lo estudiado por Ettouney en el 2009.<sup>140</sup>

**Tabla 19.** Costo de producción unitario estimado para los principales procesos de desalinización

Proceso	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	Costo unitario del producto (USD/m <sup>3</sup> )
MED	1.000	1,38 – 1,45
MED	12.000 - 55.000	0,95 – 1,95
MED	100.000	0,54
MED	205.000	0,52
MSF	1000	1,2 – 1,34
MSF	23.000 – 528.000	0,52 – 1,75
MSF	205.000	0,52
VC	1.000	1,02
VC	1.000 – 1.200	-
RO	1.000	1,8

**Tabla 19.** (Continuación).

Proceso	Capacidad (m <sup>3</sup> /día)	Costo unitario del producto (USD/m <sup>3</sup> )
RO	12.000 – 60.000	0,44 – 1,62
RO	65.000 – 170.000	0,7
RO	205.000	0,45

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

<sup>140</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 103. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

Los costos unitarios de producto mostrados en la Tabla 19 varían demasiado, en parte porque la ubicación de la planta y la calidad del agua de alimentación son fundamentales en el funcionamiento de una planta de ósmosis inversa. El costo reportado en la Tabla 19 se encuentra en un rango entre 1,02 y 1,45 USD/m<sup>3</sup> para capacidades de producción menor a 1.000 m<sup>3</sup>/día, lo cual se debe a la baja capacidad y la elevada depreciación anual de la planta. En instalaciones con capacidades superiores a 65.000 m<sup>3</sup> diarios el costo unitario esta entre 0,45 y 0,7 USD/m<sup>3</sup>, haciendo que el proceso sea muy competitivo frente a los procesos térmicos. Por esta razón, en la actualidad, Ettouney y Wilf<sup>141</sup> concluyeron que la mayoría de plantas de OI se construyen con capacidades superiores a 40.000 m<sup>3</sup>/día.

**Tabla 20.** Costos de producción de agua en algunas plantas de desalinización (Hasta 2009)

Planta	País	Proceso	Costo del agua (USD/m <sup>3</sup> )	Capacidad de planta (m <sup>3</sup> /día)	Fecha de estimación
Shuweihat	EAU	MSF	1,13	454.610	2008
Ras Laffan	EAU	MSF	0,80	272.520	2008
Hidd	EAU	MSF	0,69	400.000	2008
Tenes	Argelia	OI	0,59	200.000	2008
Taunton	USA	OI	1,53	18.925	2008
Palmachim	Israel	OI	0,86	83.270	2008
Oued sebt	Argelia	OI	0,68	100.000	2008
Hadera	Israel	OI	0,86	330.000	2008
Ashkelon	Israel	OI	0,78	326.144	2008
Tianjin	China	OI	0,95	150.000	2007
Dhekalia	Chipre	OI	0,88	40.000	2007
Carlsbad	USA	OI	0,77	189.250	2007
Pert	Australia	OI	0,75	143.700	2006
Marafiq	Arabia Saudita	MED	0,83	758.516	2006
Shoaiba 3	Arabia Saudita	MSF	0,57	881.150	2005
Reliance refinery	India	MED	1,53	14.400	2005

**Fuente:** MICALE, G.; CIPOLLINA, A. y RIZZUTI, L. Seawater desalination. conventional and renewable energy processes.

En los países del Medio Oriente, en donde los procesos térmicos son los dominantes, la desalación se produce en plantas adaptadas para cogeneración y que tienen capacidades de producción entre los 200.000 y 1'000.000 de m<sup>3</sup> diarios. En estas instalaciones grandes, se espera que el costo unitario de producto sea cercano a 0,5 USD/m<sup>3</sup> sin importar el método de desalinización usado.

<sup>141</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 104. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.



**Tabla 21.** Costos de la desalinización en las plantas de ósmosis inversa

Tipo de agua de alimentación	Capacidad de desalinización de la planta (m <sup>3</sup> /día)	Costo de la desalinización (USD/m <sup>3</sup> )
Agua salobre	<20	5,63 – 12,9
	20 – 1.200	0,78 – 1,33
	40.000 – 46.000	0,26 – 0,54
Agua de mar	<100	1,5 – 18,75
	250 – 1.000	1,25 – 3,93
	15.000 – 60.000	0,48 – 1,62
	100.000 – 320.000	0,45 – 0,66

**Fuente:** SHATAT, M. y RIFFAT, S. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.

Como se ha mencionado en esta subsección, el costo de la desalinización en el proceso de ósmosis inversa depende notablemente del tipo de agua de alimentación. En la Tabla 21. se puede observar que es mucho más sencillo y económico desalinizar aguas salobres que agua de mar, y conlleva capacidades de producción mucho menores. Lo anterior se debe a la diferencia en el contenido de SDT en cada tipo de agua. Las aguas salobres consumen menos energía a la hora de ser desaladas, y al tener menos sólidos disueltos, es más fácil retenerlos en las membranas. Desalar agua de mar requiere de importantes cantidades de energía y capacidades de producción, sin importar cuál sea la tecnología adoptada.

Adicionalmente los procesos de desalación pueden acoplarse a fuentes de energía renovables, sin embargo, el uso de combustibles fósiles sigue dominando debido a las barreras técnicas y económicas existentes. En los sistemas convencionales de desalinización de agua de mar se pueden obtener costos cercanos a 0,5 USD/m<sup>3</sup> y llegar hasta 1,95 USD/m<sup>3</sup>, a excepción de las plantas de capacidades de producción excesivamente pequeñas. Por otra parte, al desalar aguas salobres los costos se reducen casi hasta la mitad. Si se decide acudir a fuentes de energía renovables, el costo puede aumentar drásticamente (hasta triplicarse) a causa de los sistemas de energías más costosos e innovadores, sin embargo, el costo se ve compensado por la reducción del impacto ambiental.

El consumo energético y el costo unitario del producto del proceso de ósmosis inversa presentan ventajas importantes frente al resto de las tecnologías, debido a que no necesitan cambios de estado (MED, MSF y VC) que puedan aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero según el estudio realizado por Devora, Gonzalez y Ruiz.<sup>142</sup>

<sup>142</sup> DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 39. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

**Tabla 22.** Comparación de los costos de los principales procesos de desalinización de agua de mar

Proceso	MSF	MED	OI
Costos de inversión (USD/m <sup>3</sup> .día)	1.700 – 2.900	1.700 – 2.700	1.300 – 2.500
Costos de operación (USD/m <sup>3</sup> .día)	0,65 – 1,25	0,67 – 0,96	0,58 – 0,88
Costo total anualizado (USD/m <sup>3</sup> .día)	0,84 – 1,6	1,21 – 1,59	1,06 – 1,36

**Fuente:** DÉVORA, G.; GONZÁLEZ, R. y RUÍZ, S. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México.

En las últimas 3 décadas, se han logrado avances importantes en la reducción del consumo energético y la mejoría en el diseño de los procesos. La Tabla 22 muestra los costos generales de una planta MSF, MED y OI. Una vez más, los factores que más varían son los costos asociados al consumo energético y a la inversión.

**Gráfica 16.** Porcentaje de los diferentes costos anuales de las principales tecnologías de desalinización

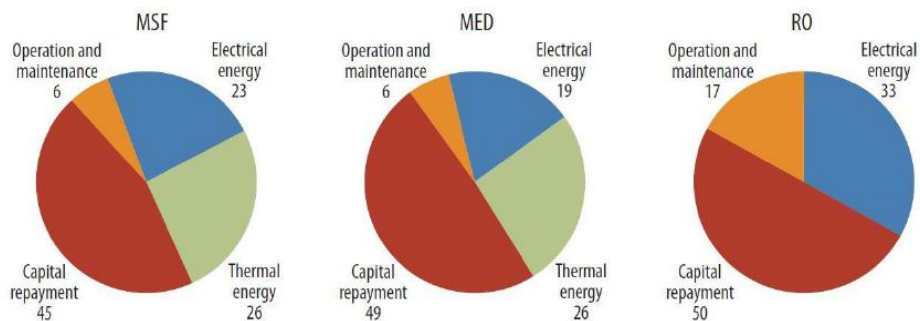


Fig. 3. total annual cost percentage to the main desalination technologies.

**Fuente:** DÉVORA, G.; GONZÁLEZ, R. y RUÍZ, S. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México.

En la subsección 5.2.1 se describieron todos los factores que afectan los costos del proceso de desalinización. No obstante, los más influyentes a la hora de estimar el costo unitario del producto son los costos asociados a la operación y mantenimiento, costos de amortización de capital, y los costos asociados tanto a energía térmica como eléctrica. En la Gráfica 16. es sencillo notar que una gran porción del costo de los procesos MSF y MED se debe a la energía térmica; al suprimir el uso de energía térmica en el proceso de ósmosis inversa, se puede aumentar el presupuesto de la operación y el mantenimiento y del uso de energía eléctrica para otorgarle la mayor eficiencia posible al proceso de membrana, siendo esta una razón fundamental para la preferencia que ha adquirido el proceso de OI.

**Cuadro 4.** Principales indicadores de diferentes procesos de desalinización

INDICADORES	Consumo de Energía Fósil	Costos Unitarios	Tendencias Mundiales	Fuentes de Energía
Procesos				
Ósmosis Inversa	De 2 a 2.8 kWh/m <sup>3</sup>	0.60 USD/m <sup>3</sup>	Crecimiento	Eléctrica
Electrodialisis	De 16 a 19 kWh/m <sup>3</sup>	58 USD/m <sup>3</sup>	Estático	Eléctrica
Destilación Multi-efecto MED	De 3.4 a 4 kWh/m <sup>3</sup>	1.5 USD/m <sup>3</sup>	Decreciente	Eléctrica Calorífica
Evaporación Multi-etapas Flash MSF	De 5 a 8 kWh/m <sup>3</sup>	1.10 USD/m <sup>3</sup>	Decreciente	Eléctrica Calorífica

**Fuente:** LECHUGA, J.; RODRÍGUEZ, M. y LLOVERAS, J. Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica.

Se deben desarrollar e impulsar avances que permitan un acoplamiento de los sistemas de desalinización con fuentes de energía renovable<sup>143</sup>, sin un aumento tan drástico en los costos del proceso. El Cuadro 4. Presenta indicadores que pueden ser útiles para la selección de un proceso de acuerdo a la conveniencia o favorabilidad que presente en alguno de los aspectos propuestos.

### 5.3 SOSTENIBILIDAD

El agua y el desarrollo sostenible están fuertemente ligados. El agua posee tres pilares fundamentales en cuanto a su contribución al desarrollo sostenible; a continuación se muestran las tres dimensiones relacionadas con las sostenibilidad del proceso:

- La pobreza: Según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) para el 2012 habían aproximadamente 1.200 millones de personas viven en regiones con escasez crítica de agua dulce y situaciones de pobreza extrema. Las limitaciones para acceder al agua por parte de la sociedad pobre se deben a factores económicos, así como presiones sociopolíticas, territoriales, ambientales, estructurales y de gobernanza.

Eliminar el hambre y la pobreza extrema ha sido la principal prioridad en los objetivos del Desarrollo sostenible, y de hecho, en algunos países (Brasil, China e India) se han llevado a cabo importantes avances para reducir considerablemente la pobreza. Lastimosamente, aunque la gestión integrada de los recursos hídricos se debe regir por la eficiencia económica, la sostenibilidad ambiental y la igualdad

<sup>143</sup> ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth & SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. [Science Direct]. Toowoomba, AU: Energy Procedia, 2016. Vol. 110, No. 1, p. 268. ISSN: 1876-6102. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

social, a este último enfoque según la UN WWAP<sup>144</sup> se le da muy poca prioridad en el momento en que se toman las decisiones relacionadas con otorgar beneficios hídricos, generando exclusiones en el acceso al agua para grupos sociales sin poder.

- **Desarrollo económico:** Para la UN WWAP<sup>145</sup> Invertir en infraestructuras hídricas favorece notablemente la liberación del potencial de crecimiento económico en la etapa inicial del desarrollo económico de un país. Cuando los beneficios secundarios del desarrollo posterior empiezan a decaer, los países deben enfatizarse en aumentar el desarrollo de las capacidades humanas e institucionales, mejorando la eficiencia de los recursos hídricos y la sostenibilidad, y garantizando los beneficios del desarrollo económico y social. Para la ONU<sup>146</sup> una vez que los beneficios marginales del desarrollo posterior decrecen, el énfasis debe desplazarse paulatinamente hacia la construcción de capacidades humanas e institucionales para mejorar la eficiencia hídrica y la sostenibilidad y garantizar los beneficios del desarrollo económico y social. Para lograr apoyo financiero en las actividades económicas e infraestructuras (materiales e inmateriales), se debe asegurar que la calidad y cantidad de agua para el consumidor sea fiable.

También se deben fomentar las políticas de apoyo a las actividades que generan ingresos para pequeños productores, generando crecimiento económico en las zonas rurales.

- **Protección ambiental de los Ecosistemas según la UN WWAP<sup>147</sup>:** La buena salud de los ecosistemas proporciona una variedad de servicios hídricos muy valiosos para la sociedad, pues permite el control de las inundaciones, la purificación del agua, la estabilización de las orillas de los ríos y la protección contra la erosión, la conservación de la biodiversidad, el reabastecimiento de las aguas del subsuelo, el transporte, el turismo y el entretenimiento.

Probablemente, el principal desafío en la actualidad de la desalinización del agua es su sostenibilidad. Por ejemplo, la economía se convirtió en una preocupación importante debido a que los precios de la energía crecían rápidamente y eran de

---

<sup>144</sup> UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Agua Para Un Mundo Sostenible: Datos y Cifras. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. Perugia, IT: Ediciones UNESCO, 2015. p. 2. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>145</sup> *Ibíd.*, p. 3.

<sup>146</sup> ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS. ONU. Objetivos del desarrollo sostenible: 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Objetivo 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. [sitio web]. Objetivos. [Consultado el 5 Mayo del 2017]. Disponible en: <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>

<sup>147</sup> UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Agua Para Un Mundo Sostenible: Datos y Cifras. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. Perugia, IT: Ediciones UNESCO, 2015. p. 5. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

carácter extremadamente fluctuante, convirtiéndose en la fracción dominante del costo del agua desalinizada producida.

La desalinización del agua se realiza usando una gran diversidad de tecnologías, que están evolucionando gradualmente para disminuir los costos de capital, el consumo energético y los impactos ambientales. La desalación de agua de mar consume grandes cantidades de energía y materiales, y tiene un impacto importante y cada vez más reconocido en el área ambiental. La investigación y el desarrollo, la construcción mejorada, la operación, la asignación de costos en plantas de usos múltiples, los métodos de financiación, y el intercambio de educación e información deben continuar avanzando para reducir el costo del agua desalada producida y aumentar la sostenibilidad del proceso.

## 6. FUTURO DE LA DESALINIZACIÓN

En el siglo XXI, los procesos de desalinización térmica han seguido varias tendencias novedosas. Estas tendencias se deben a la necesidad de hacer que los procesos se vuelvan más competitivos y rentables frente a las tecnologías de membrana, logrando así reducir el costo de producción unitario. Las principales tendencias adoptadas en las últimas dos décadas se presentan a continuación:

- Se ha aumentado la capacidad de producción por unidad de operación, generando una reducción en el costo unitario del producto. La capacidad de las unidades de tecnología MED ha aumentado a un capacidades superiores a 35.000 m<sup>3</sup> diarios, mientras que las plantas MSF recientes tienen capacidades promedio por unidad entre 50.000 y 75.000 m<sup>3</sup>/día.
- Los materiales de construcción utilizados poseen un rendimiento mejorado en comparación con los materiales comunes. Un ejemplo es la sustitución del acero inoxidable 316L por acero inoxidable dúplex. Este último posee una vida útil más prolongada y una mayor resistencia a la corrosión. Así mismo, los tubos de titanio dan un rendimiento superior al proceso, en comparación a cuando se usan tubos de cobre y níquel, en secciones de bajas temperaturas en la tecnología MSF y MED.
- La experiencia y el constante estudio y evolución en las áreas de construcción y operación de las plantas MSF y MED han generado diagramas de flujo de proceso más sencillos y eficientes. Lo anterior se refleja en la eliminación de unidades costosas (controles, bombas, válvulas, etc.) que resultan redundantes en el proceso. También, gracias a la experimentación, las especificaciones de diseño se han vuelto menos estrictas, lo que permite reducir costos de capital y de operación. Algunos ejemplos son el uso de factores de incrustación más pequeños, mayores áreas de transferencia de calor y la reducción de los espesores de las paredes de los tubos, todas son características que aumentan la eficiencia térmica del proceso.
- El uso de modalidades de contrato o concesiones BOOT (construir, operar, poseer y transferir) ha llevado a que los costos de construcción y operación de las plantas de desalación sean más bajos. La ventaja anterior se puede observar al final del proceso, en el costos unitario del producto según la aplicación optada por Ettouney.<sup>148</sup>
- El uso de sistemas recuperadores de energía con intercambio de presión. Esta modalidad es ampliamente utilizada en la desalinización por ósmosis inversa de agua de mar, aunque no se ha extendido para la desalación de aguas salobres.

---

<sup>148</sup> ETTOUNEY, Hisham & WILF, Mark. Commercial Desalination Technologies: An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater Desalination Processes. [Google Academic]. Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes. 6th ed. Palermo, Italia: Springer, 2009. p. 88. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

- Implementación de sistemas de membrana híbridos en grandes instalaciones. Adicionalmente se reduce notablemente el consumo de energía.
- La ultrafiltración se ha extendido como proceso de pretratamiento en las plantas grandes. Aunque reduce en pequeñas proporciones el consumo energético, en algunas plantas han surgido problemas y el pretratamiento no alcanza a cubrir las necesidades de calidad del agua de alimentación de la planta. El continuo desarrollo y evolución de las membranas de ultrafiltración han aumentado su competitividad frente a las membranas de nanofiltración.
- Uso de membranas más grandes (16-18”) en instalaciones grandes, aunque sin mucha aceptación debida al peso de la membrana y las dificultades de operación que esto conlleva. El consumo energético se reduce en pequeñas proporciones.
- Modificaciones en la superficie de las membranas (nanotubos, nanopartículas, etc.). Las membranas se empezaron a comercializar a pasos pequeños, hasta que grandes empresas expandieron el negocio. Los nuevos desarrollos reducen los costos asociados al consumo energético, pero no han evolucionado al paso esperado.
- La preferencia hacia las plantas grandes antes que las pequeñas, es decir, la aceptación de la economía de escala por encima del consumo energético localizado, descarga de residuos (salmuera), proximidad al consumidor final y gestión de la producción. Lo anterior radica en que el consumo energético es menor en las plantas grandes.
- Bajo el pensamiento futurista de Zarzo y Prats<sup>149</sup> se ha tomado la iniciativa de dosificar e incluso eliminar el uso de productos químicos en el proceso, reduciendo los costos de producción y los impactos ambientales, además, no tienen gran influencia en el consumo energético del proceso.
- Fomentación del desarrollo y constante estudio de equipos que posean procedimientos de auto limpieza de las membranas de ósmosis inversa, aumentando su vida útil y disminuyendo los costos de operación y mantenimiento.
- Procesos como la electrodiálisis, MSF y MED están acoplándose a sistemas de energía renovable como energía solar o eólica según el análisis realizado por Lechuga, Rodríguez y Lloveras.<sup>150</sup>

---

<sup>149</sup> ZARZO, Domingo & PRATS, Daniel. Desalination and energy consumption: What can we expect in the near future?. [Elsevier Science Publishers]. Alicante, ES: Desalination, 2017. Vol. 427, No. 1, p. 8. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>150</sup> LECHUGA, Jorge; RODRÍGUEZ, Marisela & LLOVERAS, Joaquim. Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. [Google Academic]. Yucatán,

Los procesos de desalinización de agua de mar han tenido un gran desarrollo y han adquirido una significativa importancia en la producción de agua potable, adicionalmente han reducido los costos de operación gracias a las innovaciones aplicadas. Lo anterior ha permitido que su competitividad y aceptación como alternativa de abastecimiento de agua dulce haya aumentado, en especial en países que se encuentran en zonas de alta escasez de agua. No obstante, los costos del proceso de desalinización siguen siendo altos para algunos países, por ejemplo, en Colombia aún no es posible adoptar el proceso debido a sus elevados costos de inversión.

Lo anterior sustenta la necesidad de mantener e incluso incrementar la investigación y el desarrollo tecnológico del proceso, conduciendo a una drástica reducción en los costos de producción unitarios del agua desalinizada. Como se ha resaltado a lo largo de este proyecto, el objetivo de las técnicas de desalación es producir agua dulce a un costo accesible. A continuación se mencionan algunos aspectos que deben continuar bajo investigación y desarrollo<sup>151</sup>, buscando siempre alcanzar el objetivo principal del proceso:

- Mejoría de aspectos técnicos y económicos de las diferentes tecnologías.
- Acoplamiento de las técnicas a sistemas eficientes de energía y cogeneración.
- Utilización de energías renovables como energía nuclear, solar o eólica.
- Reducción de pretratamientos químicos para disminuir costos de inversión y operación.
- Desalinización térmica a mayores temperaturas.
- Desarrollo y perfeccionamiento de sistemas híbridos como ósmosis inversa/Destilación multi-etapa ó Destilación multi-etapa/ósmosis inversa/nanofiltración.
- Integración, optimización e hibridación de electricidad, agua y vapor.
- Mejora y desarrollo de membranas de ósmosis inversa.
- Constante crecimiento de la capacidad de producción de las plantas de desalinización (economía de escala).
- Disminuir impactos ambientales asociados a la descarga de salmuera.
- Disminuir el potencial de aparición de corrosión e incrustaciones.
- Establecer los mejores criterios de selección de materiales de construcción, y desarrollar materiales de bajo costo.
- Mejoría de la dureza del agua desalada mediante métodos magnéticos.
- Implementación de sistemas de control inteligentes para las tecnologías de desalinización.

---

MX: Ingeniería, 2007. Vol. 11, No. 3, p. 9. ISSN: 1665-5290. [Consultado el 23 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

<sup>151</sup> KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 63. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.



Todo lo mencionado en este capítulo ha llevado a que las potencias mundiales en los procesos de desalinización desarrollen nuevas tecnologías, las cuales se encuentran bajo investigación, sin superar la etapa de planta piloto o sin la construcción de prototipos. A continuación se mencionan las tecnologías emergentes con mayor reconocimiento, sin embargo, no se describen debido a que no tienen aún aceptación en el mundo de la desalinización:

- Osmosis directa
- Pervaporación (PV)
- Destilación de membranas (MD)
- Desionización capacitiva (CDI)
- Uso de grafeno nanoporoso
- Membranas biomiméticas
- Celdas de combustible microbianas
- Bioelectrogénesis
- Metátesis y electrodiálisis con membranas bipolares
- Otros (ultrasonido, cavitación, etc.).

Todas las tecnologías anteriormente mencionadas se han estudiado bajo el objetivo de disminuir el consumo energético de la desalinización. A corto plazo, no se espera que ninguna de estas técnicas reduzca significativamente el consumo de energía, por lo que es improbable que la ósmosis inversa pierda su dominio a mediano o corto plazo. Sin embargo, las investigaciones y el potenciamiento de las ventajas de las técnicas emergentes han encontrado aplicaciones potenciales interesantes, por ejemplo:

- Producción de energía utilizando un gradiente de salinidad.
- Mejoría de la eficiencia de las tecnologías actuales.
- Desarrollo de sistemas híbridos.
- Mejoría en los tratamientos de salmuera.

Para Zarzo y Prats<sup>152</sup> es evidente, que la aplicación con mayor potencial de las tecnologías emergentes es la producción de energía por medio de un potencial osmótico, sin embargo, se cree que los procesos híbridos, de electro-separación y de recuperación de metales son los más prometedores en el área de la desalación de salmueras.

---

<sup>152</sup> ZARZO, Domingo & PRATS, Daniel. Desalination and energy consumption: What can we expect in the near future?. [Elsevier Science Publishers]. Alicante, ES: Desalination, 2017. Vol. 427, No. 1, p. 6. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

## 7. CONCLUSIONES

- Existen dos grupos de procesos de desalinización; en el primero se encuentran aquellas tecnologías que utilizan energía térmica para llevar a cabo un cambio de fase y una separación del agua de las sales, destacándose la destilación multi-etapa (MSF) y la destilación multi-efecto (MED), mientras que el segundo grupo abarca técnicas que utilizan membranas para llevar a cabo la separación del agua de las sales, como la ósmosis inversa (OI), o la separación de las sales del agua, como la electrodiálisis (ED).
- En la actualidad, el proceso con mayor aceptación industrial a nivel mundial es la ósmosis inversa, pues la continua mejora de las propiedades de las membranas ha permitido que en factores como el consumo energético, el tamaño de la instalación, los impactos ambientales o la facilidad de operación tome ventaja frente a los procesos de desalación térmica. Las tecnologías de MSF o MED son muy utilizadas industrialmente en los países del golfo pérsico debido al fácil acceso a los combustibles fósiles, y al amplio conocimiento que se tiene en esa región acerca de las técnicas de separación térmicas.
- Los costos de capital y los costos asociados al consumo energético son los factores económicos que mayor influencia tienen en los costos unitarios del producto, sea cual sea la tecnología utilizada. Así mismo, los impactos ambientales sobre el ecosistema marino, e incluso, la emisión de gases contaminantes presentan limitaciones legislativas, y en muchas ocasiones generan costos adicionales para cumplir con la normatividad vigente.
- Las técnicas de desalinización surgen para suplir una parte de la demanda hídrica mundial, y facilitar el acceso al agua potable en zonas donde es escasa. Las técnicas térmicas presentan la ventaja de producir agua de alta pureza, con mucha utilidad en actividades industriales, mientras que para el consumo humano es más común utilizar tecnologías de membrana. El menor consumo energético es la principal ventaja de la ósmosis inversa frente a los procesos MED y MSF.
- La desalinización de agua de mar para la potabilización del agua es una alternativa que cada día tiene más aceptación en todo el mundo. La expansión del proceso se verá influenciada por la posibilidad de realizar sistemas híbridos o de poder acoplar las tecnologías a fuentes de energía renovables, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad del proceso y disminuyendo los costos de las plantas, haciendo más accesibles estas técnicas para países con escasos recursos y contribuyendo al abastecimiento de la demanda de agua potable en todo el planeta.

## **8. RECOMENDACIONES**

Es recomendable continuar la investigación en los campos de las nuevas tecnologías de desalinización, enfocándose en los procesos híbridos y en el acoplamiento de fuentes de energía renovables que hagan que el proceso tenga una mayor sostenibilidad. La desalinización es un proceso alternativo por lo que es susceptible a constantes cambios. Es necesario actualizar la información acerca del proceso constantemente mediante bases de datos específicas para el tema.

La desalación es un proceso con un gran potencial, sin embargo, en Colombia su aplicación es casi nula. Nuestro país tiene acceso a dos océanos, en algún momento tendremos que disponer de agua de mar, así que se hace necesario incentivar estudios e investigaciones acerca del proceso de la desalinización de agua de mar en Colombia, enfocándose en los aspectos económico y social que abarcan las diferentes tecnologías.

Promover el adecuado uso y distribución del recurso, pues el hecho de desarrollar e implementar un proceso para el abastecimiento alterno del agua, no debe implicar la explotación total de los recursos hídricos de agua dulce. La desalinización se ha desarrollado como un proceso complementario para ayudar suplir las necesidades del ser humano, no como un proceso que cubra la totalidad de la demanda hídrica mundial, ni a corto ni a mediano plazo.

## BIBLIOGRAFÍA

ACCIONA AGUA. Tratamiento De Agua De Mar y Salobre (IDAM/IDAS). [Sitio web]. Madrid, ES. Áreas de actividad. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.accion-agua.com/es/areas-de-actividad/dc-plantas-tratamiento-agua/tratamiento-de-agua-de-mar-y-salobre-idamidas/>

ACWA POWER. Projects. [Sitio web]. Riad, SA. Assets. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.acwapower.com/en/projects/assets/>

AGUASISTEC. Planta Desaladora o Planta De Tratamiento De Agua De Mar. [Sitio web]. Lima, PE. Productos de Tratamiento de Agua y Aguas Residuales. [Consultado el 6 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.aguasistec.com/planta-desaladora.php>

ALKAISI, Ahmed; MOSSAD, Ruth & SHARIFIAN-BARFOROUSH, Ahmad. A review of the water desalination systems integrated with renewable energy. [Science Direct]. Toowoomba, AU: Energy Procedia, 2016. Vol. 110, No. 1, p. 268-274. ISSN: 1876-6102. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

AL-ZUBAIDI, A.A.J. Sea Water Desalination in Kuwait: A Report on 33 Years Experience. [Elsevier Science Publishers]. Shamiya, KW: Desalination, 1987. Vol. 63, No. 1, p. 1-55. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

ARREGUÍN, Felipe & MARTÍN, Alejandra. Desalinización del agua. [Repositorio Institucional del IMTA]. Ciudad de México, MX: Ingeniería Hidráulica en México, 2000. Vol. 15, No. 1, p. 27-49. [Consultado el 13 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

BAMILO, Lucía; GÓMEZ, Susana & COPPARI, Norberto. Tecnologías de proceso para la desalinización de aguas. [Comisión Nacional de Energía Atómica]. Buenos Aires, AR: 2002. Vol. 9, No. 1, p. 22-27. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

BENITO, Marcos, *et al.* Diseño de una Desaladora de Agua de Mar de 60.000 m<sup>3</sup>/día con Pretratamiento de Ultrafiltración. [Google Academic]. 1<sup>a</sup> ed. Madrid, ES: Fundación EOI, 2010. p. 38-12. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

BIRKETT, J. History, Development and Management of Water Resources. [UNESCO]:1st ed. Nobleboro, US: Ediciones UNESCO, 2010. p. 1-439. ISBN: 978-1-84826-869-2. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

BORSANI, Roberto & REBAGLIATI, Silvio. Fundamentals and costing of MSF desalination plants and comparison with other technologies. [Elsevier Science

Publishers]. Genova, IT: Desalination, 10 de Marzo del 2005. Vol. 182, No. 1, p. 29-37. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 22 de Marzo del 2018]. Archivo en pdf.

CABERO, Julen. Proceso de Desalación de Agua de Mar Mediante un Sistema de Ósmosis Inversa de Muy Alta Conversión en Tres Etapas con Recirculación de Permeado y Doble Sistema de Recuperación de Energía. [Google Academic]. Bilbao, ES: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2015. p. 46. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

CORREA, Felipe. Evaluación de la Sustentabilidad en la Instalación de Plantas Desaladoras, de Agua de Mar, en la Región Noroeste de México. [Google Academic]. Las Palmas de Gran Canaria, ES: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2007. p. 4-8. ISSN: 1927-9566. [Consultado el 6 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DAWOUD, Mohamed & AL MULLA, Mohamed. Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study. [Science Target]. Dubai, AE: International Journal of Environment and Sustainability, 2012. Vol. 1, No. 3, p. 22-37. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DE LA CRUZ, Carlos. La Desalinización de Agua de Mar Mediante el Empleo de Energías Renovables. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Fundación alternativas, 2006. p. 66. [Consultado el 5 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DELGADO, Agustín. Diseño Preliminar de un Sistema de Desalación por Ósmosis Inversa Mediante Energía Solar Térmica. [Google Academic]. Tenerife, ES: Universidad de la Laguna, 2007. p. 1-403. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DELGADO, Diana. Análisis Comparativo de los Procesos de Desalinización del Agua: Destilación Súbita por Efecto Flash (MSF) Frente Osmosis Inversa (OI), Bajo la Metodología de Evaluación de Ciclo de Vida. [Google Academic]. Guayaquil, EC: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2007. p. 5-9. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DEVIS, Andrea, *et al.* Ocean thermal energy resources in Colombia. [Elsevier Science Publishers]. Medellín, CO: Renewable Energy, 2014. Vol. 66, No. 1, p. 759-769. ISSN: 0960-1481. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DÉVORA, Germán; GONZÁLEZ, Rodrigo & RUÍZ, Saúl. Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. [Google Academic]. Ciudad Obregón, MX: Tecnología y Ciencias del Agua, 2013. Vol. 4, No. 3, p. 27-46. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

DOOSAN. Water Plants: Seawater Desalination Plants. [Sitio web]. Seúl, KR. Business areas. [Consultado el 21 de Marzo del 2018]. Disponible en: <http://www.doosan.com/en/business/water-plants/seawater-desalination-plants/>

EL-DESSOUKY, Hisham & ETTOUNEY, Hisham. Fundamentals of Salt Water Desalination. [Elsevier Science Publishers]. 1ª ed. Amsterdam, NL: Elsevier Science B.V., 2002. p. 670. ISBN: 0-444-50810-4. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

FÖRARE, Jonas & HENTHORNE, Lisa. Desalination: A Critical Element of Water Solutions for the 21st Century. [Google Academic]. 1ª ed. Estocolmo, SE: The Swedish Research Council Formas, 2009. p. 47-57. ISBN: 978-91-540-6034-4. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

GIMÉNEZ, Xavier. El Mar es Básico. [Sitio web]. Barcelona, ES. Química, aire y ambiente. 3 de Marzo del 2015. [Consultado el 8 de Marzo de 2018]. Disponible en: <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/39/posts/el-mar-es-bsico-13433>

GLEESON, Tom, *et al.* The global volume and distribution of modern groundwater. [Nature Geoscience]. Montreal, CA: Macmillan Publishers, 2015. Vol. 9, p. 161-167. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

GREENPEACE COLOMBIA. Contaminación: Agua. [Sitio web]. Bogotá, CO. Campañas. [Consultado el 26 de Febrero del 2018]. Disponible en: <http://www.greenpeace.org/colombia/es/campanas/contaminacion/agua/>

IDE TECHNOLOGIES. Desalinización. [Sitio web]. Kadima, IL. Soluciones. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.ide-tech.com/es/solutions/desalination-es/>

INTERNATIONAL DESALINATION ASSOCIATION. IDA Desalination Yearbook 2017-2018. [Google Academic]. 1ª ed. Oxford, GB: Media Analytics Ltd., 2018. p. 1-216. ISBN: 978-1-907467-52-3. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

KHAWAJI, Akili; KUTUBKHANAH, Ibrahim & WIE, Jong-Mihn. Advances in seawater desalination technologies. [Elsevier Science Publishers]. Al-Sinaiyah, AE: Desalination, 2008. Vol. 221, No. 1, p. 47-69. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 27 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

LECHUGA, Jorge; RODRÍGUEZ, Marisela & LLOVERAS, Joaquim. Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. [Google Academic]. Yucatán, MX: Ingeniería, 2007. Vol. 11, No. 3, p. 5-14. ISSN: 1665-5290. [Consultado el 23 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

LIOR, Noam. *Advances in Water Desalination*. [Google Academic]. 1ª ed. New Jersey, US: John Wiley & Sons, Inc., 2013. p. 687. [Consultado el 22 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

MARTINS, Alejandra. ¿Puede La Desalinización Ser La Solución Para La Crisis Mundial Del Agua? [Sitio web]. Noticias. 22 de Marzo del 2017. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>

MICALE, Giorgio; CIPOLLINA, Andrea & RIZZUTI, Lucio. *Seawater Desalination: Conventional and Renewable Energy Processes*. [Google Academic]. 6th ed. Palermo, IT: Springer, 2009. p. 302. [Consultado el 28 de Febrero de 2018]. Archivo en pdf.

MONTAÑO, Borja. *Análisis Económico De La Desalinización*. [Google Academic] Alicante, ES: AQUAE Fundación, 2016. p. 23. [Consultado el 2 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

MOROTE, Álvaro; RICO, Antonio y MOLTÓ, Enrique. La producción de agua desalinizada en las regiones de Murcia y Valencia: Balance de un recurso alternativo con luces y sombras. [Documents d'anàlisi geogràfica]. Alicante, ES: Instituto Interuniversitario de Geografía, 2016. Vol. 63, No. 2, p. 473-502. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. *World Ocean Atlas 2013*. [Sitio web]. Silver Spring, US: National Oceanographic Data Center. 5 de Marzo de 2018. [Consultado el 03/082018]. Disponible en: <http://www.nodc.noaa.gov>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. OMS. *Guías Para la Calidad del Agua Potable: Recomendaciones*. [Biblioteca de la OMS]. 3ª ed. Ginebra, CH: Ediciones de la OMS, 2006. p. 11-12. ISBN: 92-4-154696-4. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. ONU. *Decenio Internacional Para La Acción: El Agua Fuente De Vida*. [Sitio web]. París, FR. Decenio del agua. 24 de Noviembre del 2014. [Consultado el 26 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/scarcity.shtml>

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. ONU. *Water and Energy Sustainability*. [Sitio web]. Zaragoza, ES. Water for Life Decade. 16 de Enero del 2014. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. Disponible en: [http://www.un.org/waterforlifedecade/water\\_and\\_energy\\_2014/](http://www.un.org/waterforlifedecade/water_and_energy_2014/)

OSORIO, A.; ORTEGA, Santiago & ARANGO, Santiago. Assessment of the marine power potential in Colombia. [Elsevier Science Publishers]. Medellín, CO: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. Vol. 53, No. 1, p. 966-977. ISSN: 1364-0321. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

PONTIUS, F. Treatability of a Highly-Impaired, Saline Surface Water for Potential Urban Water Use. [MDPI]. Riverside, US: Water, 2018. Vol. 324, No. 10, p. 1-14. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. RAE. Definición De 'Desalinizar'. [Sitio web]. Madrid, ES. 20 de Diciembre del 2017. [Consultado el 02/282018]. Disponible en: <http://dle.rae.es/?id=CPF8F80|CPFxS8m>

RUÍZ, Miguel. Situación Global De La Desalación. [Sitio web]. Madrid, ES. Blogs EOI Claustro. 26 de Febrero del 2014. [Consultado el 23 de Febrero de 2018]. Disponible en: <http://www.eoi.es/blogs/miguelangelruizjimenez/2014/02/26/situacion-global-de-la-desalacion/>

RUÍZ, Antonio. Los Vertidos al Mar de las Plantas Desaladoras. [Google Academic]. 1ª ed. Madrid, ES: Ambienta, 2007. p. 51-57. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

SAIF, Omar. The Future Outlook of Desalination in the Gulf: Challenges & Opportunities Faced by Qatar & the UAE. [Google Academic]. 1ª ed. Doha, QA: 2012. p. 41. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

SCHORR, Michael. Desalination, Trends and Technologies. [Google Academic]. 1ª ed. Rijeka, HR: InTech, 2011. p. 346. ISBN: 978-953-307-311-8. [Consultado el 1 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

SHATAT, Mahmoud & RIFFAT, Saffa. Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. [Google Academic]. Nottingham, GB: International Journal of Low-carbon Technologies, 2012. Vol. 9, No. 1, p. 1-19. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

SPIEGLER, K. Principles of Desalination. [Google Academic]. 2ª ed. Londres, GB: Academic Press, 1980. Vol. 2. p. 475. ISBN: 0-12-656702-6. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. América Latina y El Caribe: Perspectivas Del Medio Ambiente. [Publicaciones UNESCO]. 1ª ed. San José, CR: Ediciones UNESCO, 2003. p. 1-281. ISBN 92-807-2295-6. [Consultado el 9 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.



UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Water for People, Water for Life: Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2003. p. 8. ISBN 92-303881-5. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Water: A Shared Responsibility. [Publicaciones de la UNESCO]. 2ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2006. p. 1-584. ISBN: 92-3-104006-5. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Agua Para Un Mundo Sostenible: Datos y Cifras. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. Perugia, IT: Ediciones UNESCO, 2015. p. 1-2. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Water for A Sustainable World. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2015. p. 1-122. ISBN 978-92-3-100071-3. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. UN WWAP. Aguas Residuales: El Recurso Desaprovechado. [Publicaciones de la UNESCO]. 1ª ed. París, FR: Ediciones UNESCO, 2017. p. 1-9. ISBN: 978-92-3-300058-2. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

VENERA, Ronald & BONILLA, Edwin. Diseño de una Planta Desalinizadora de Agua de Mar para la Isla de San Andrés. [Google Academic]. Bucaramanga, CO: Universidad Santo Tomás, 2017. p. 1-155. [Consultado el 27 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

VEOLIA WATER TECHNOLOGIES. Líderes En Desalación De Agua De Mar y Salobre. [Sitio web]. [Consultado el 21 de Marzo de 2018]. París, FR. Desalación. Disponible en: <http://www.veoliawatertechnologies.es/Municipal/desalacion-de-agua-de-mar-y-salobre/>

YOUNOS, Tamim & TULOU, Kimberly. Overview of Desalination Techniques. [Universities Council on Water Resources]. Blacksburg, US: Journal of Contemporary Water Research & Education, 2005. Vol. 132, No. 1, p. 3-10. [Consultado el 13 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.

ZARZO, Domingo & PRATS, Daniel. Desalination and energy consumption: What can we expect in the near future?. [Elsevier Science Publishers]. Alicante, ES: Desalination, 2017. Vol. 427, No. 1, p. 1-9. ISSN: 0011-9164. [Consultado el 20 de Marzo de 2018]. Archivo en pdf.