



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**IMPACTOS AMBIENTALES DE LAS PLANTAS DESALADORAS  
POR EL USO DE LA ENERGÍA**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA**

**RICARDO SÁNCHEZ PÉREZ**



**MÉXICO, D.F.**

**2012**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: Víctor Manuel Luna Pabello

**VOCAL:** Profesor: Néstor Noé López Castillo

**SECRETARIO:** Profesor: Felipe Muñoz Gutiérrez

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Leticia Valle Arizmendi

**2° SUPLENTE:** Profesor: Alfonso Durán Moreno

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM, EDIFICIO BERNARDO QUINTANA 2º NIVEL, CUBÍCULO 315**

**ASESOR DEL TEMA:**

**M.I. Felipe Muñoz Gutiérrez**

**SUSTENTANTE (S):**

**Ricardo Sánchez Pérez**

A mis padres, porque sin ellos mi existencia y la existencia de mis logros no hubiese sido realidad.

A mis hermanas, porque espero que mi ejemplo las motive a seguir adelante para alcanzar sus sueños.

A Lorena, porque ha sabido ser la mujer que cualquier hombre quisiese a su lado.

A toda mi demás familia, porque es un orgullo ser parte de ella y les tengo un gran cariño.

***“Ad Altiora, et meliora,  
Semper”***

**“Por mi raza hablará el  
espíritu”**

## **Agradecimientos**

A la UNAM, por haberme permitido formar parte de su comunidad desde el nivel medio superior y por brindarme las herramientas para enriquecer mis conocimientos académicos y personales.

A la Facultad de Química por haber sido mi segundo hogar durante más de 4 años y por ayudar a mi formación como profesionista y mejor ser humano.

Al Instituto de Ingeniería, UNAM, por haberme permitido ser parte del personal de trabajo del área de Mecánica y Energía para poder realizar el Servicio Social, la Estancia Académica y este proyecto de Tesis, además de brindarme un apoyo económico durante un semestre para su realización.

A mi asesor, Felipe Muñoz, por haberme permitido trabajar con él y ser parte muy importante en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Víctor Manuel Luna Pabello y al Dr. Néstor Noé López Castillo por brindarme su apoyo en la corrección de este trabajo.

A mis padres, Armando Sánchez y Leticia Pérez, porque su consejo y apoyo me enseñaron que el esfuerzo es la mejor herramienta para conseguir lo que se desea.

A mis hermanas, Gaby y Laura, porque la vida sin ellas no sería tan buena, y porque el saber que mi ejemplo les servirá, es una de las motivaciones más fuertes que tengo para seguir adelante.

A Lorena Gómez, porque su apoyo, cariño y comprensión son parte fundamental en mi vida, tantas vivencias juntos son irremplazables.

A mis primos, Omar, Jessica y Michelle, por ser como mis hermanos y compartir grandes momentos en mi vida.

A mis tíos, Marisol y René, porque son como unos segundos padres para mí.

A mis tíos, Estela y Juan Manuel, porque fueron los hermanos mayores que no tuve y me sirvieron de ejemplo para tener un buen camino.

A mis abuelos, Patricio (Q.E.P.D.) y Ana María, porque plantaron la semilla para que mi vida y la vida de toda mi familia estuviese siempre llena de cariño y de alguien que se preocupase por nosotros.

A Genaro Juárez, porque el haberlo conocido sirvió de inspiración para haber llegado hasta donde estoy y para querer seguir adelante.

A los pequeños de la familia, Laura, Michelle, Xana y Esteban, porque son el futuro de la misma y deseo que lleguen muy lejos y logren grandes cosas.

A Cristian García y Antonio Ramírez, por ser los más grandes amigos que he tenido y haberme compartido su conocimiento personal y académico que me permitieron ser un mejor estudiante y una mejor persona, además de haber compartido muchas aventuras desde hace 9 años. Además agradezco a Cristian por ser un excelente compañero de trabajo y equipo en una gran cantidad de asignaturas y haber estado conmigo en las buenas y en las malas en la Facultad.

A mis amigos de la Facultad porque mi estancia ahí fue más divertida y las experiencias que compartimos tanto académicas como personales me sirvieron mucho.

A todos los profesores, en cuya clase fue un placer estar y que me permitieron absorber la mayor cantidad de conocimientos que me servirán como herramienta en la vida profesional.

Al profesor Filiberto Rivera, por haberme brindado su tutoría y consejo en el PRONABES para ser un mejor estudiante y seguir adelante.

Al Programa Nacional de Becas (PRONABES) porque el apoyo económico brindado fue pieza clave en la terminación de mis estudios.

A todos aquellos que de alguna manera influyeron en mi vida para lograr mis cometidos que hoy se ven reflejados en el cierre de esta etapa y que seguirán en etapas consecutivas.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	11
RESUMEN .....	12
CONTENIDO.....	14
CAPÍTULO 1 .....	15
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	15
1.1. Introducción.....	15
1.2. Objetivos .....	18
CAPÍTULO 2 .....	19
PRINCIPALES PROCESOS DESALADORES Y SUS TRATAMIENTOS.....	19
2.1. Procesos desaladores.....	19
2.1.1. Proceso EME (evaporación de múltiple efecto) .....	19
2.1.2. Proceso EIME (evaporación instantánea de múltiple etapa) .....	20
2.1.3. Proceso OI (ósmosis inversa).....	22
2.2. Pretratamiento .....	23
2.2.1. Mecanismos de ensuciamiento.....	24
2.2.2. Estrategias antiensuciamiento .....	25
2.3. Postratamiento.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.3.1. Métodos de remoción del boro y descripción del proceso	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CAPÍTULO 3 .....	41
COSTOS DE LOS PROCESOS DESALADORES.....	41
3.1. Principales factores que afectan los costos de la desalación .....	43
3.1.1. Fuente de energía .....	43
3.1.2. Fuente de agua de alimentación.....	44
3.1.3. Disponibilidad de tierra .....	46
3.1.4. Disposición del concentrado/salmuera .....	46
3.2. Análisis comparativo de los sistemas OI .....	48
3.2.1. Análisis de la inversión .....	48
3.2.2 Análisis de los costos de operación .....	51
3.3. Análisis comparativo de los sistemas EME y EIME .....	56
3.3.1 Análisis de la inversión .....	56
3.3.2 Análisis de los costos de operación de los procesos EME y EIME .....	58

3.4. Costos por la energía.....	60
3.4.1. Combustibles.....	61
3.4.2. Energía eléctrica.....	61
CAPÍTULO 4 .....	62
IMPACTOS AMBIENTALES.....	62
4.1. Levantamiento topográfico.....	67
4.2. Despeje y desbroce del área.....	67
4.3. Nivelación y compactación.....	67
4.4. Zanja en tierra con entibación, zanja en playa y enterramiento de la tubería .....	67
4.5. Obra civil.....	68
4.6. Instalación de tramo difusor .....	68
4.7. Absorción de agua de mar .....	68
4.8. Operación de bombas.....	69
4.9. Descarga de salmuera .....	69
4.9.1. Salinidad y temperatura.....	69
4.9.2. Biocidas.....	73
4.9.3. Metales pesados .....	74
4.9.4. Antiincrustantes .....	75
4.9.5. Coagulantes [Plantas de OI].....	76
4.9.6. Agentes antiespumantes [Plantas térmicas] .....	76
4.9.7. Químicos de limpieza .....	76
CAPÍTULO 5 .....	79
AGUA, ENERGÍA E IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS.....	79
5.1. Agua y energía.....	79
5.2. Plantas termoeléctricas .....	80
5.3. Necesidades energéticas de la desalación .....	82
5.4. Uso de la energía e implicaciones ambientales.....	84
5.5. Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	86
5.6. Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ).....	87
5.7. Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ).....	88
5.8. Compuestos orgánicos volátiles diferentes de metano (COVDM) .....	90
5.9. Ozono (O <sub>3</sub> ).....	91
CAPÍTULO 6 .....	93
MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MITIGACIÓN Y COMPENSACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES .....	93
6.1. Descripción de las estrategias o sistema de medidas preventivas .....	93
6.2. Descripción de las estrategias o sistema de medidas de mitigación .....	96

6.3. Descripción de las estrategias o sistema de medidas de compensación .....	104
6.4. Uso de la energía.....	104
6.5. Energías renovables .....	105
6.5.1. Energía alternativa .....	105
6.5.2. Clasificación .....	105
6.6. Centrales eléctricas de origen renovable .....	106
6.6.1. Centrales eólicas .....	108
6.6.2. Centrales de biomasa.....	111
6.6.3. Centrales solares.....	113
6.6.4. Centrales hidroeléctricas .....	122
6.6.5. Energía geotérmica .....	123
6.6.7. Inconvenientes de la energía renovable .....	124
CAPÍTULO 7 .....	127
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN .....	127
7.1. Impactos ambientales .....	140
7.2. Medidas de solución a los impactos ambientales.....	145
CAPÍTULO 8 .....	152
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	152
REFERENCIAS .....	154

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del agua en el mundo [4].....	15
Figura 2. Crecimiento exponencial de la población del mundo, 1750-2050 [5] .....	16
Figura 3. Diagrama del proceso EME .....	20
Figura 4. Diagrama del proceso EIME .....	21
Figura 5. Descripción del fenómeno de la ósmosis inversa en tres pasos .....	22
Figura 6. Diagrama del proceso OI.....	23
Figura 7. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio físico.....	64
Figura 8. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio bioecológico .....	65
Figura 9. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio socioeconómico....	66
Figura 10. Esquema de funcionamiento de una planta termoeléctrica clásica .....	81
Figura 11. Evolución de la concentración de CO <sub>2</sub> en la atmósfera .....	87
Figura 12. Parque "off-shore" cerca de Copenhague.....	109
Figura 13. Sección vertical a través de un estanque solar con gradiente salino .....	117
Figura 14. Emisiones de CO <sub>2</sub> por producción y uso de energía, 1970-2025 (millones de toneladas) [66].....	143
Figura 15. Emisiones de GEI por gas para período 1990-2002 [83] .....	143

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Inversión OI a diferentes valores de salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN) [20] .....	48
Tabla 2. Costos de operación OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m <sup>3</sup> ) [20].....	51
Tabla 3. Inversión por salinidad de agua de alimentación y flujo de agua producto para sistemas EME Y EIME(MXN) [20] .....	56
Tabla 4. Costos de operación por salinidad de agua de alimentación y flujo de agua producto para sistemas EME y EIME(MXN/m <sup>3</sup> ) [20].....	58
Tabla 5. Costos del combustible para desalación de agua de mar (MXN/m <sup>3</sup> ) en función de su naturaleza [20].....	61
Tabla 6. Costos del consumo eléctrico de las plantas EIME y EME [20] .....	61
Tabla 7. Resumen de sustancias vertidas .....	77
Tabla 8. Requerimientos energéticos de los procesos de desalación (kWh/m <sup>3</sup> ) .....	83
Tabla 9. Consumo eléctricos de las plantas EIME y EME .....	83
Tabla 10. Plantas OI impulsadas por celdas fotovoltaicas .....	115
Tabla 11. Plantas de destilación solar .....	121
Tabla 12. Resumen procesos desaladores.....	127
Tabla 13. Opciones de pretratamiento [13].....	132
Tabla 14. Límites permisibles de características bacteriológicas .....	133
Tabla 15. Propiedades organolépticas permisibles.....	133
Tabla 16. Características químicas permisibles.....	134
Tabla 17. Gases de efecto invernadero y cargas emitidas .....	142
Tabla 18. Gases de efecto invernadero y cargas totales mundiales .....	144
Tabla 19. Problemática y medidas de mitigación.....	146
Tabla 20. Análisis comparativo de las diferentes energías renovables [85] .....	147

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Inversión OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN).....	137
Gráfica 2. Costos de operación OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m <sup>3</sup> ) .....	138
Gráfica 3. Inversión EME y EIME por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN) .....	138
Gráfica 4. Costos de operación EME y EIME por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m <sup>3</sup> ).....	139

## RESUMEN

El presente estudio es una herramienta conceptual y analítica que suministra información relacionada con los principales procesos de tratamiento de agua salada para producir agua dulce y los impactos sobre el medio ambiente asociados a ellos, con un enfoque dirigido a los impactos producidos por el uso de la energía.

Como resultado de esta investigación, se determinó que los impactos ambientales que las plantas desaladoras de agua generan sobre el medio físico y biótico se generan, como en la mayoría de los proyectos, desde la preparación del sitio, pasando por la construcción hasta su operación.

También se encontró que los impactos dados durante las primeras dos etapas no son considerados graves debido a que son temporales. En general, son de ámbito visual, sonoro (ruido), levantamiento de suelos, remoción de materiales, suspensión de partículas, contaminación por basura e invasión de otras áreas no establecidas para el proyecto y afectación de la vegetación y fauna existente en el área definida para el desarrollo del proyecto.

Por otra parte, los impactos más importantes, de las plantas desaladoras de agua, se originan a través de la vida útil del proyecto y son la producción de la corriente de rechazo o salmuera con una concentración en sales mayor a la de la corriente de alimentación y a mayor temperatura, en el caso de las plantas térmicas aproximadamente entre 90 y 120 °C, y la toma de agua de alimentación que podrían afectar las condiciones marinas y a las especies vegetales y animales que se encuentren en esas áreas.

En la parte de las plantas que funcionan por destilación, el vertido de salmuera representa de 8 a 10 veces el volumen de agua desalada con una concentración de 60,000 a 65,000 ppm, mientras que en plantas de membranas de ósmosis inversa, el volumen de salmuera es menor que en las anteriores (2.5 a 3 veces el volumen de agua desalada) pero el vertido tiene un contenido en sales mucho mayor.

En la corriente de rechazo también se incluyen las especies químicas usadas en el pretratamiento de las corrientes de alimentación mediante estrategias antiensuciamiento como son los antiincrustantes, antiespumantes, coagulantes, biocidas y anticorrosivos.

En el ámbito de la generación de energía para impulsar los procesos desaladores tanto térmica como mecánicamente, el principal impacto ambiental es la generación de gases de efecto invernadero debido a la combustión de combustibles fósiles, entre los gases liberados se encuentran  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  y COVDM, cuya presencia en el ambiente, genera repercusiones en la salud (enfermedades y males respiratorios desde la irritación de la vía respiratoria hasta la posibilidad de causar asma, bronquitis, enfisema pulmonar y trastornos cardiacos) cuando las personas se exponen a límites que sobrepasen  $5 \text{ g/m}^3$  de densidad en el  $\text{CO}_2$ ,  $200 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  por hora para  $\text{NO}_2$ ,  $250 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  para  $\text{SO}_x$  y  $120 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  para  $\text{O}_3$  que es un sucesor de los COVDM.

El uso de fuentes de energía renovable parece una alternativa razonable a la solución del problema anterior; sin embargo, algunos inconvenientes se presentan durante su utilización, lo que nos lleva a analizar muy bien la situación antes de pensar en aplicarlas.

## **CONTENIDO**

De manera específica, en el capítulo 1, se definen los objetivos de este trabajo y las razones para utilizar los procesos de desalación de agua de mar en la producción de agua potable, esto es, por la insuficiencia de este recurso que se ha incrementado en los últimos tiempos y la mejora en las tecnologías de desalación que ha permitido el aumento de su eficiencia. En el capítulo 2, se describen los principales procesos de desalación así como los procesos, reacciones químicas y sustancias usadas en el pretratamiento del agua de mar para someterla a la desalación y al postratamiento del agua producto, donde se encontró que el sistema de ósmosis inversa es el que está teniendo un mayor crecimiento y uso comercial debido al requerimiento bajo de energía y bajos costos de operación y de inversión que fueron presentados y analizados cuantitativamente en el capítulo 3. En el capítulo 4, se abordan los impactos generales de las plantas desaladoras mediante el apoyo en una matriz de impacto ambiental, se encontró que la afectación de la corriente de salmuera concentrada, es uno de los problemas más importantes debido a su constante rechazo hacia el ecosistema marino. En el capítulo 5, se describe la relación agua-energía, además de presentar los requerimientos energéticos de las principales tecnologías de desalación y los impactos en el medio ambiente debidos al uso de la energía, se halló la contribución en la producción de gases de efecto invernadero y los problemas de salud y medioambientales que provocan, por lo que, en el capítulo 6, se presentan medidas de prevención, mitigación y compensación para los problemas originados por las tecnologías de desalación, es notable que el uso de fuentes alternativas a los combustibles fósiles, en la producción de energía, representa una oportunidad de mejora; en especial la energía eólica y la energía solar, que deben ser bien aplicadas a cada caso para mejorar la situación ambiental y no provocar problemas adicionales ; en el capítulo 7, se realiza un análisis y discusión de la información recopilada, finalmente, las conclusiones y algunas recomendaciones son presentadas en el capítulo 8.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1. Introducción

En los últimos tiempos ha ido creciendo una problemática mundial que es inherente a la disponibilidad de recursos naturales, dentro de los cuales podemos encontrar los relacionados a las formas de energía y al agua.

En torno al agua, Figura 1, es sabido que la cantidad disponible de ella para el consumo humano, dada su baja salinidad (aprox. 250 ppm), es mínima, aproximándose al 0.5% de la existente en el planeta; mientras tanto, el agua de mar constituye alrededor del 97% de la cantidad mundial y, lamentablemente, su uso es casi nulo por su alta salinidad (aprox. 35,000 ppm).

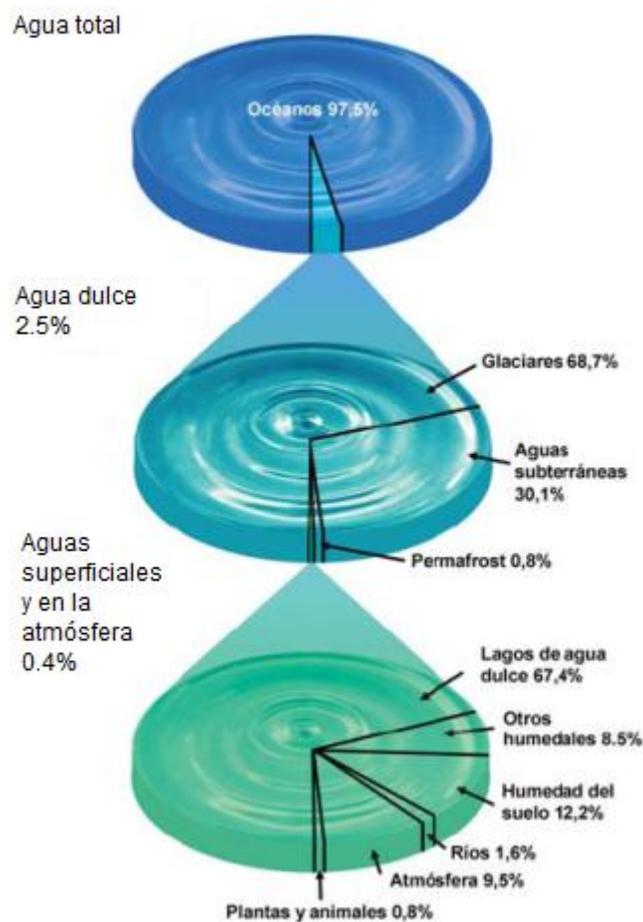
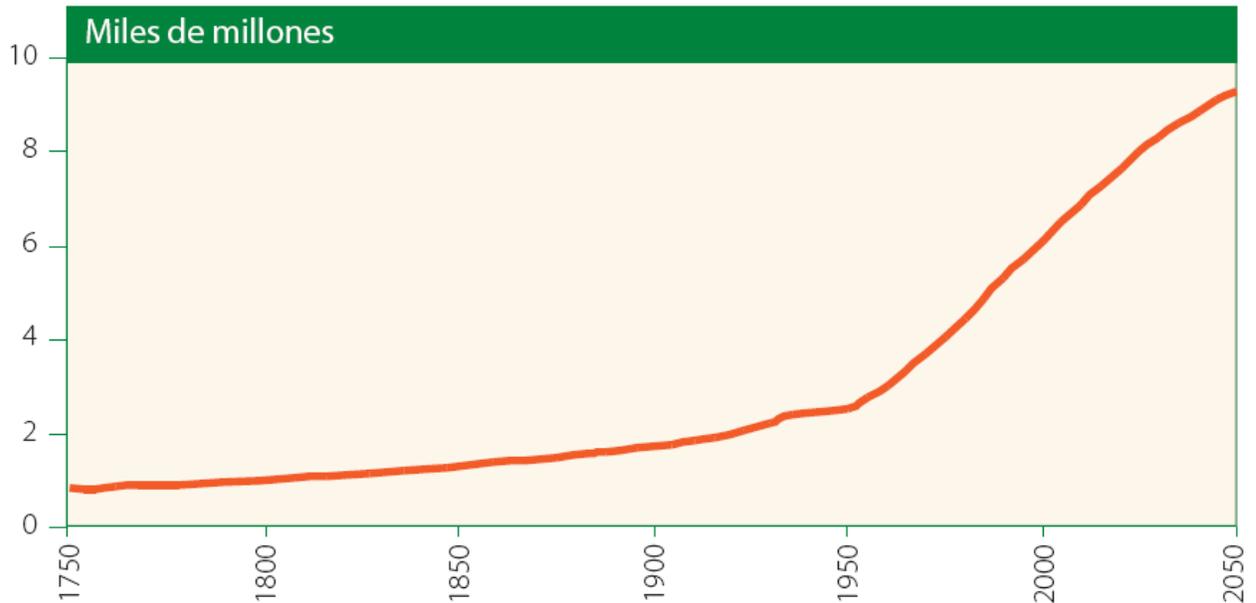


Figura 1. Distribución del agua en el mundo [4]

A través de la desalación se transforman aguas que no son útiles para el consumo humano, riego, uso industrial y diversos fines. Dado lo anterior, es menester, a nivel mundial y dentro de las posibilidades, desarrollar nuevas tecnologías y realizar investigaciones que permitan al humano aprovechar, sustentablemente, éste recurso, considerando que en los últimos 50 años la población creció en 220% como lo muestra la Figura 2.



**Figura 2. Crecimiento exponencial de la población del mundo, 1750-2050<sup>1</sup> [5]**

Existe una enorme responsabilidad por participar en soluciones a los problemas anteriores, siendo útil la promoción del cuidado, ahorro y uso del agua, así como la incorporación a proyectos de investigación inherentes al tema. Esto es, sin lugar a dudas, un gran reto que en ayuda conjunta puede ser logrado.

La desalación, definida como la separación del agua de sus componentes salinos, provenientes de agua marina, aguas salobres interiores, aguas subterráneas mineralizadas (por ejemplo, salmueras geotérmicas), es una de las soluciones a la falta de disponibilidad de recursos hídricos porque permite la transformación de estos tipos de aguas en aguas utilizables para consumo humano, riego, uso industrial y distintos fines; sin embargo, su aplicación es generalmente costosa y se limita a la espera de inexistencia de otras fuentes de agua dulce.

<sup>1</sup> Para después de 2010, las proyecciones se basan en la variante media

La desalación de agua de mar es una idea antigua. Aristóteles describió un método de evaporación utilizado por marineros griegos del siglo IV antes de Cristo. Un escritor árabe del siglo VIII después de Cristo redactó un documento considerado actualmente como un tratado de destilación de agua marina. En el siglo XIX, el desarrollo de la navegación a vapor demandó agua no corrosiva para las calderas y la primera patente para un proceso de desalinización se concedió en Inglaterra en 1869. El mismo año, la primera planta de destilación de salmuera fue construida por el gobierno británico en Adén, con la intención de proveer de agua pura a buques con parada en el puerto del Mar Rojo. La primera planta de desalación de agua marina por destilación, para proveer de agua dulce con fines comerciales, opera aún, a pesar de haber sido construida en 1930, en Aruba, cerca de Venezuela.

Las tecnologías existentes en este proceso se dividen en procesos térmicos, cuyo principio se basa en la transferencia de energía en forma de calor con cambio de fase en el agua, y en los de membrana, con la utilización de materiales sintéticos que permiten semipermeable el agua para separarla de los componentes indeseados. Un dato importante es que la evaporación instantánea de múltiple etapa (EIME) es el proceso térmico más común para la desalación de cantidades relativamente grandes de agua de mar y uno de los más grandes sistemas EIME, localizado en Al-Jubail, Arabia Saudita, produce más de 750 millones de litros (200 millones de galones) de agua desalada al día.

Los procesos de membrana se utilizan generalmente con el agua salobre de los mares interiores, en los que el contenido de sal, aunque indeseable, es considerablemente inferior a la del agua de mar. Dentro de estos procesos está la electrodiálisis y la ósmosis inversa, teniendo que una de las mayores plantas desaladoras de ósmosis inversa en funcionamiento se encuentra en Ashqelon, Israel, y puede producir unos 300 millones de litros (80 millones de galones) de agua desalada al día.

En muchas zonas del mundo, especialmente en regiones áridas y densamente pobladas, el agua desalinizada es la principal fuente de suministro de agua municipal. La desalinización es usada en más de 100 países, y cerca de tres cuartas partes de toda el agua desalada se produce en el Oriente Medio y África del Norte. Los Estados Unidos es el segundo país del mundo en el uso de la desalinización, lo que representa aproximadamente el 15% de la producción total (en su mayoría en Florida, Texas y California). Aproximadamente la mitad de las plantas de

desalinización utilizan el sistema de destilación EIME, compitiendo con la ósmosis inversa. Sin embargo, debido a la mejora continua de la eficiencia y durabilidad de las membranas sintéticas, la demanda del mercado de ósmosis inversa está creciendo más rápido que el de los sistemas de varias etapas de evaporación instantánea, además de que la ósmosis inversa requiere menos energía para producir agua potable de lo que requiere la evaporación, por lo anterior y por la mejora de las tecnologías y la optimización de procesos con el paso del tiempo, la desalación, pese a ser costosa y con alto uso de energía, podrá ser en un futuro una de las principales fuentes de agua para la población mundial.

## **1.2. Objetivos**

Objetivo general:

Determinar, teóricamente, los impactos ambientales por la energía utilizada en los principales procesos de desalación de agua y las posibles medidas de prevención, mitigación y compensación de dichos impactos.

Objetivos específicos:

- Describir los impactos generales que las plantas de desalación de agua tienen sobre el medio físico, biótico y socioeconómico, desde su construcción hasta su operación.
- Jerarquizar los impactos originados por la operación de las plantas desaladoras identificando los más importantes.
- Mencionar medidas de prevención, mitigación y/o compensación para los impactos hallados, con enfoque en aquellas dirigidas al uso de la energía.
- Proponer qué medida(s) de la(s) mencionada(s) es(son) la(s) más adecuada(s) para los impactos originados por el uso de energía de acuerdo a sus ventajas y desventajas.

## **CAPÍTULO 2**

### **PRINCIPALES PROCESOS DESALADORES Y SUS TRATAMIENTOS**

#### **2.1. Procesos desaladores**

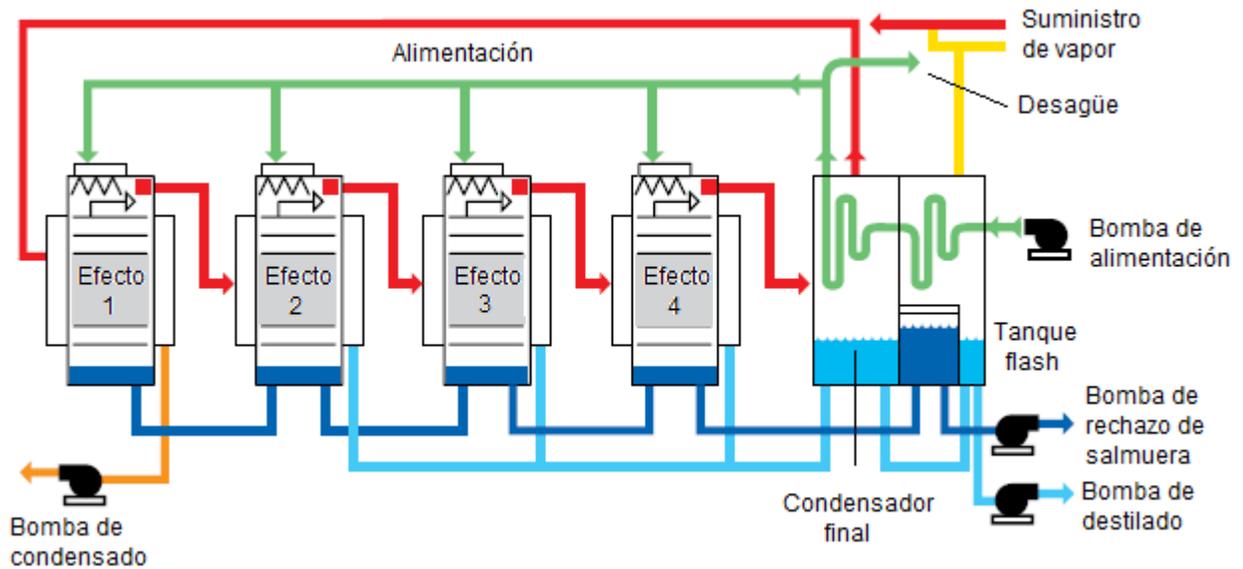
La salinidad del agua de mar es de alrededor de 35,000 ppm y, hasta el día de hoy, no puede ser utilizada en ninguna aplicación. También existen las aguas salobres que tienen una concentración de más de 1,000 ppm y menor que la del mar. El agua potable debe tener menos de 250 ppm, aunque existen regiones en las que se consume agua de hasta 1,000 ppm. También algunas aplicaciones de riego agrícola permiten esta concentración; sin embargo, un volumen irrelevante de la producción así como el deterioro total de ésta en un tiempo relativamente corto son las consecuencias del uso de agua con elevada concentración de sales. Para utilizar el agua salada como potable se debe disminuir su salinidad mediante un proceso de desalación y separar el agua potable con baja salinidad.

En general, existen dos grandes tipos de procesos desaladores: los térmicos y los de membrana. En los térmicos existe cambio de fase de líquido a vapor y de líquido a sólido (esta última ya en desuso). En la actualidad se utilizan tres procesos: Evaporación de Múltiple Efecto (EME), Evaporación Instantánea de Múltiple Etapa (EIME) y Compresión de Vapor (CV). Los procesos de membrana son Ósmosis Inversa (OI) y Electrodialisis (en adelante, ED), siendo la primera la de mayor aplicación. Ambos tipos de procesos presentan ventajas como desventajas y, en general, la OI representa la tecnología que está ganado más terreno en la actualidad.

##### **2.1.1. Proceso EME (evaporación de múltiple efecto)**

Se basa en la evaporación de agua de mar, la cual en un primer efecto se lleva a cabo en una cara de los tubos de un intercambiador que aprovecha el calor latente desprendido por la condensación del vapor de caldera o de la extracción de una turbina, el condensado se envía nuevamente a la caldera o al condensador de la planta termoeléctrica. El vapor producido se alimenta como elemento calefactor en el siguiente efecto, a menor presión que el primero, produciendo vapor nuevamente por el calentamiento del agua de mar concentrada, proveniente del primer efecto. El condensado del segundo efecto, y los posteriores, se colectan y son el agua

dulce producto (destilado); en el último efecto se utiliza un condensador externo usando como elemento refrigerante el agua de mar que es la alimentación del primer efecto (Figura 3). Generalmente se usan entre 5 y 8 efectos, dependiendo de la capacidad de la planta y la economía [6].



**Figura 3. Diagrama del proceso EME**

### 2.1.2. Proceso EIME (evaporación instantánea de múltiple etapa)

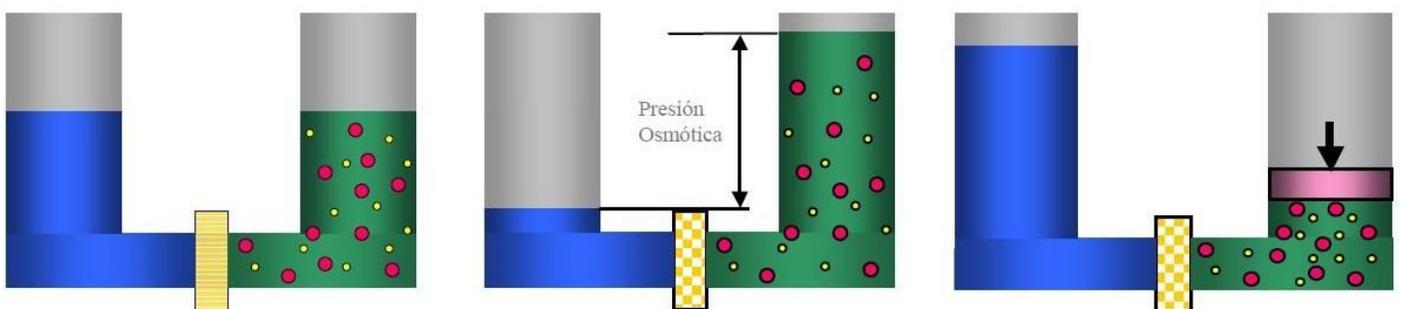
El proceso incluye tres secciones principales: el calentamiento de la salmuera, la sección de recuperación del calor y la sección de rechazo de calor. El número de etapas en la sección de recuperación es más grande que en la sección de rechazo. El calentador de la salmuera impulsa los procesos instantáneos de evaporación a través del calentamiento de la corriente de salmuera recirculada hasta la temperatura más alta, que constituye un parámetro muy importante de diseño. La evaporación instantánea ocurre en cada etapa donde una pequeña cantidad de agua es generada y acumulada a través de las etapas en las dos secciones.



La salmuera retirada es rechazada al mar y la salmuera recirculada es introducida a la última etapa en la sección de recuperación de calor. Unidades adicionales en la planta desaladora incluyen el pretratamiento de las corrientes de alimentación y corrientes de agua de mar de enfriamiento. El tratamiento de la toma de agua de mar es limitado a un cribado y filtración simples. Por otro lado, el tratamiento de la alimentación de agua de mar es más costoso e incluye desaereación y la adición de antiincrustantes e inhibidores de espuma. Otras unidades básicas en el sistema incluyen unidades de bombeo para el agua de mar alimentada y la salmuera recirculada. También, existen sistemas de venteo de gases que operan en las etapas de evaporación instantánea para remover los gases no condensables [7].

### 2.1.3. Proceso OI (ósmosis inversa)

Con base en la figura 5, se describirá a continuación el proceso de la ósmosis inversa. Si en el proceso de equilibrar la concentración de una disolución salina mediante la ósmosis, situamos un émbolo sobre la superficie de la solución salina y ejercemos una presión mecánica sobre ella, cuando llegemos a igualar la presión osmótica, ocurrirá que el proceso se equilibra y habrá tantas moléculas de agua atravesando la membrana semipermeable en una dirección como en la otra y la columna de líquido será igual a ambos lados de la membrana. Si continuamos aumentando la presión sobre la disolución salina, el equilibrio se invierte, pasando más moléculas de agua desde la solución salina hacia el lado de agua pura que en el sentido contrario. Es decir obtendremos agua pura a partir de la solución salina. Este proceso es conocido como ósmosis inversa [8].

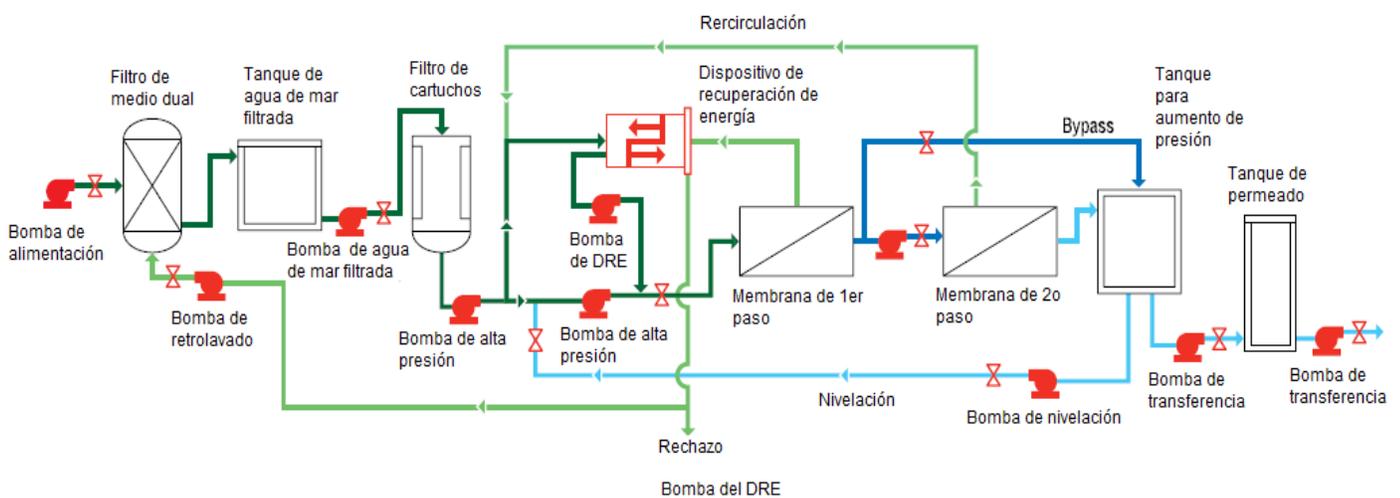


**Figura 5. Descripción del fenómeno de la ósmosis inversa en tres pasos**

Las plantas desaladoras de ósmosis inversa aprovechan el proceso descrito anteriormente: se incrementa la presión del agua a desalar (mediante bombas alimentadas con energía eléctrica de la red) y se pasa el agua a través de unos tubos con membranas semipermeables en su interior

que impiden (con un cierto rendimiento) el paso de sales y dejan pasar agua. De esta forma el agua se separa en dos corrientes, una con alta concentración de sales (la corriente que no ha atravesado la membrana semipermeable) que es conocida como salmuera y la otra con baja concentración de sales (la corriente que ha atravesado la membrana semipermeable que es conocida como agua permeada). El agua permeada está a baja presión y la salmuera está a alta presión, por lo que antes de evacuar la salmuera, se recupera parte de su energía, mediante distintos sistemas de recuperación de energía como son las turbinas Pelton, los sistemas de intercambio de presión y los turbocargadores (turbocompresores) [8].

En la Figura 6 está representado un diagrama de flujo de una planta de ósmosis inversa.



**Figura 6. Diagrama del proceso OI**

El módulo de ósmosis inversa consiste de una etapa simple de  $n_p$  tanques conectados en paralelo con  $n_m$  membranas conectadas en serie dentro de cada tanque. En los sistemas comerciales, el número de membranas por tanque es entre 6 y 8 [9].

## 2.2. Pretratamiento

La toma de agua y los sistemas de pretratamiento del agua de mar, así como la descarga de la salmuera tienen que adaptarse a condiciones específicas en la construcción de cada planta. De ese modo uno de los más importantes prerequisites para una operación exitosa y segura a largo plazo de las plantas desaladoras de agua de mar es un consistente pretratamiento de alta calidad del agua de alimentación [10].

Debe prestarse cuidadosa atención al pretratamiento de agua marina porque, por lo general, es obtenida de fuentes superficiales, las cuales están sujetas a variaciones temporales de salinidad, temperatura, a actividad biológica y a perturbaciones producidas por tormentas. Una opción es construir dentro del mar, o cerca de éste, cisternas, que provean un agua de alimentación libre de sustancias en suspensión y que sean menos susceptibles a perturbaciones y variaciones temporales. Los sistemas de pretratamiento deben ser cuidadosamente diseñados, monitoreados y operados para evitar inconvenientes [11].

Hoy en día, las tecnologías de pretratamiento están divididas en pretratamiento convencional, que incluye desinfección, coagulación/floculación, cloración, inyección de antiincrustantes, procesos de filtración, y pretratamiento no convencional como microfiltración, ultrafiltración y el sistema beachwell. Los sistemas de pretratamiento típicos incluyen:

Se espera que las estrategias de antiensuciamiento: decrementsen el índice de densidad de sedimentos, remuevan la turbidez excesiva o sólidos suspendidos, inhiban o controlen la formación de incrustación, y prevengan el crecimiento de fango y microorganismos indeseados.

### **2.2.1. Mecanismos de ensuciamiento**

Los principales mecanismos de ensuciamiento de los procesos desaladores incluyen, ensuciamiento de partículas o coloidal, bioensuciamiento, ensuciamiento orgánico y ensuciamiento inorgánico (incluyendo incrustación). Las categorías coloidal y de partícula incluyen sólidos suspendidos y algunos hidróxidos que pueden acumularse en la superficie de la membrana o las tuberías a través del tiempo y forman una plasta de ensuciamiento. Microorganismos como algas, hongos y bacterias pueden secretar polímeros que los sujetan a las superficies de las membranas o tuberías y promueven el crecimiento como una biopelícula. Este proceso puede acelerar la descomposición química de las membranas de ósmosis inversa y el desgaste de las tuberías y equipos de todos los procesos, poniendo en seria amenaza la operación de las plantas. Los compuestos orgánicos consisten de ácido húmico, ácido fúlvico, polisacáridos y compuestos aromáticos que podrían causar espuma adsortiva. Por otro lado, pueden ser fuentes de energía para microorganismos. La incrustación es causada por exceder la solubilidad de las sales, pero es considerada menos problemática y puede ser controlada

mediante el ajuste de pH y la adición de antiincrustantes. Sin embargo, la prevención del ensuciamiento coloidal, orgánico y el bioensuciamiento es una tarea mucho más difícil que usualmente requiere un pretratamiento más intensivo.

## **2.2.2. Estrategias antiensuciamiento**

### Coagulación

La coagulación y floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs o flóculos tal que su peso específico supere al del agua y puedan precipitar. La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas. El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) al agua, originando productos insolubles en fracciones de segundo.

Comúnmente se usan coagulantes entre los que se incluyen alumbre, sales férricas, cal y polielectrolitos. La coagulación ha mostrado que mejora la calidad del agua en el pretratamiento convencional (filtración media) y pretratamiento de membranas de baja presión (microfiltración [MF]/ultrafiltración [UF]) del agua de mar. La coagulación también tiene el beneficio adicional de reducir el ensuciamiento en la microfiltración y la ultrafiltración y mejora la estabilidad operacional en algunas circunstancias. Sin embargo, muchos temas deben ser resueltos antes de que el pretratamiento de coagulación pueda ser aplicado óptimamente, especialmente en el campo de tratamiento de agua con membranas, tales como la selección de un tipo apropiado de coagulante para las características del agua, la dosis óptima, las estrategias de coagulación (procesos de sedimentación para la coagulación y coagulación en línea) y sobretodo costos y beneficios de los pretratamientos químicos para sistemas de membrana MF y UF.

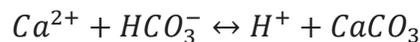
En [12] se reportó un estudio para reducir la contaminación de materiales tales como el hierro, silicio y la contaminación microbiana en el agua de alimentación aplicando una combinación de coagulación mejorada y membranas. El estudio mostró que cuando se usa ferrato (VI) de potasio como coagulante y preoxidante puede haber un incremento excelente en la remoción de algas y microbios que puede alcanzar más del 98%. Además se mostró que la turbidez es menor a 0.5

NTU (Unidades de turbidez nefelométricas), la concentración de hierro nunca excede 0.2 mg/L y la de silicio no excede 0.1 mg/L. También se mostró que la adsorción de ácido húmico por carbón activado en polvo (PAC) puede ser significativamente mayor en agua salada comparada con agua fresca a baja conductividad.

Muchas partículas tienen carga superficial negativa y repelen otras y no forman partículas de mayor tamaño y hundimiento, por ello permanecen suspendidas. Para inducir la formación de la partícula, pueden adicionarse coagulantes y polielectrolitos en las plantas desaladoras. Aunque podrían incrustarse en los intercambiadores de calor y provocar el bloqueo y la corrosión.

### Ajuste de acidez (pH)

El ajuste de acidez es una forma eficiente de controlar la incrustación del carbonato de calcio. La solubilidad del carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  depende del pH, como se puede observar en la siguiente reacción:



Adicionando  $\text{H}^+$  como ácido, el equilibrio se puede desplazar a la izquierda para mantener el carbonato de calcio disuelto. Los ajustes químicos para bajar el pH incluyen dióxido de carbono, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. El dióxido de carbono no debería ser usado para ajustar el pH de los sistemas de adición de cal debido a los problemas de incrustación asociados con el pretratamiento de cal. El ácido sulfúrico es más fácil de manejar y en muchos países, más accesible que el ácido clorhídrico; sin embargo, el sulfato adicional es sumado a la corriente de alimentación, causando potencialmente incrustación de sulfato. Debería saberse que el pH siempre cambia después de adicionarse coagulantes y el pH debe regresar a estado neutral para el agua final producida.

### Inhibición de incrustación

Antiincrustantes. La incrustación es un fenómeno de deposición de partículas sólidas no deseadas en una membrana o superficie. Sin algún medio para la inhibición de la incrustación, el desempeño del equipo que posea dichas superficies (como los equipos de ósmosis inversa o los intercambiadores de calor) será considerablemente menor, debido a que la mayoría de las aguas

que se emplean en ellos contienen concentraciones relativamente altas de sustancias tendientes a precipitarse e incrustar, como iones de calcio, bicarbonato y sulfato. Los antiincrustantes son materiales con actividad superficial que interfieren en las mencionadas reacciones de precipitación a través de tres mecanismos:

- Umbral de inhibición. Es la capacidad de un antiincrustante para mantener soluciones sobresaturadas de sales solubles.
- Modificaciones en el hábito cristalino<sup>2</sup>. Es la propiedad de un antiincrustante para distorsionar las formas del cristal, dando lugar a incrustaciones suaves y no adherentes. Cuando un cristal se empieza a formar en el nivel submicroscópico, los grupos negativos del cristal son atacados por la molécula de antiincrustante lo cual induce la interrupción del balance electrónico necesario para propagar su crecimiento.
- Dispersión. Es la capacidad de algunos antiincrustantes para adsorber cristales o partículas coloidales y difundir con ello una carga aniónica alta, lo que tiende a mantener separadas las sustancias incrustantes. La carga aniónica alta también separa las partículas de cargas fijas aniónicas presentes en la superficie de la membrana.

Durante las dos últimas décadas, las nuevas generaciones de antiincrustantes han surgido comercialmente, en la que los ingredientes activos son mezclas, en su mayoría, de peso molecular parecido a varios policarboxilatos y poliácridatos. Existen procedimientos de cálculo para predecir la probabilidad de formación de la incrustación. El uso de estos predictores depende del análisis de agua que se realiza en una fecha determinada y un conocimiento de los parámetros de diseño del sistema. Es importante buscar la optimización del tratamiento antiincrustante con respecto al tipo y la dosificación así como la identificación del antiincrustante adecuado para el uso.

Los antiincrustantes fueron inicialmente desarrollados para lograr la ebullición y el congelamiento de algunas especies químicas que se encontraban en el agua a tratar, e implementados posteriormente como aditivos para el control de la corrosión en plantas de desalación térmica, siendo hoy en día comúnmente aprobados para sistemas OI también.

Hay tres tipos diferentes de inhibidores de incrustación: hexametáfosfato de sodio (SHMP), organofosfonatos y poliácridatos.

---

<sup>2</sup> Aspecto macroscópico que presentan los minerales

Los polifosfatos fueron los primeros antiincrustantes en ser usados en escala comercial, por ejemplo, el hexametáfosfato de sodio. Los polifosfatos, al igual que los ácidos minerales, están siendo reemplazados por nuevos polímeros por las siguientes razones:

- La hidrólisis arriba de los 60 °C no sólo disminuye su eficiencia, sino que también incrementa el riesgo del incrustamiento del fosfato de calcio, cuya remoción es difícil en las superficies de intercambio de calor.
- El ortofosfato también actúa como un nutriente que podría incrementar el crecimiento bacteriano y de algas en la planta.

En contraste, los nuevos polímeros como fosfonatos y ácidos policarboxílicos son estables y altamente eficientes para el control de la corrosión en plantas de Evaporación Instantánea de Múltiple Etapa con TBTs (Temperatura más alta de la salmuera [top brine temperatura]) de hasta 110 °C. Empero, se sospecha que estos nuevos aditivos son capaces de formar también depósitos de calcio. El hexametáfosfato de sodio continúa aún en uso, pero es más común en plantas OI, cuya corriente salobre de alimentación posee una temperatura inferior a los 45 °C.

A pesar de los aspectos controversiales, los polifosfatos, polifosfonatos y ácidos policarboxílicos tienen la misma ventaja sobre el  $H_2SO_4$  de ser altamente efectivos a bajas concentraciones. Los anticorrosivos no reaccionan en proporciones estequiométricas con los corrosivos, pero interactúan con ellos en diferentes formas fisicoquímicas. La precipitación de sales es considerablemente retrasada para cationes divalentes ( $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ ) que son conservados en la solución incluso si la solubilidad de los productos está excedida (efecto retorno). Cuando los cristales iniciales son formados, el crecimiento adicional es detenido o modificado en su estructura de manera ligera dado que el inhibidor se adsorbe en la superficie del cristal. Ello puede impartir, además, cierta carga eléctrica que impide que las partículas se aglomeren. A causa de ello, las partículas se depositan en menor proporción como incrustaciones sólidas y los sistemas de limpieza de las plantas de EIME remueven continuamente cualquier lodo que pueda formarse. Muchos inhibidores capturan también otros iones como  $Fe^{2+}$  o  $Mg^{2+}$ , formando complejos solubles; sin embargo, los mecanismos subyacentes son pobremente entendidos, particularmente en sus aspectos cuantitativos, y los niveles óptimos de concentración son usualmente alcanzados empíricamente. Como una regla general, la concentración de antiincrustantes requerida crecerá en función de la TBT y conversión de agua requerida en la planta. Las recomendaciones de

concentración generales para plantas EIME fueron corregidas muchas veces debido a un mejor desempeño de los antiincrustantes así como una mayor conciencia de su consumo químico.

Los polifosfatos son el resultado de las reacciones de condensación de ácido *o*-fosfórico,  $H_3PO_4$ , y pueden ser lineales o cíclicos en cuanto a su estructura. Los polifosfatos cíclicos o metafosfatos poseen la fórmula general  $(MPO_3)_n$ , donde M es un catión monovalente como  $Na^+$  o  $H^+$ . El SHMP,  $(NaPO_3)_6$ , pertenece a este grupo y forma un complejo soluble con cationes divalentes y a causa de ello reduce la dureza del agua o la formación de complejos de iones metálicos. Los polifosfatos lineales tienen también propiedades antiincrustantes. Su fórmula general es  $M_{n+2}P_nO_{3n+1}$ , pero su composición real puede desviarse ligeramente de ella en algunos casos. Uno de estos compuestos lineales es el trifosfato de sodio (STP,  $Na_5P_3O_{10}$ ), que es recomendado por algunos fabricantes de equipos de membrana como limpiador químico.

De acuerdo con el manual técnico de membranas para ósmosis inversa de FILMTEC, el SHMP es barato pero inestable comparado con inhibidores de incrustación orgánicos poliméricos. Cantidades menores se adsorben sobre la superficie de los microcristales, previniendo además el crecimiento y precipitación de otros cristales. Debe tenerse cuidado de la hidrólisis del SHMP en la dosificación del tanque de alimentación. La hidrólisis no sólo disminuirá la eficiencia de la inhibición de la incrustación, sino también, creará el riesgo de incrustación con fosfato de calcio, por lo que el SHMP, generalmente, no se recomienda.

Los fosfonatos no son sino sales y ésteres del ácido fosfónico,  $HP(O)(OH)_2$ , y poseen uno o más grupos fosfónicos, los cuales están enlazados vía enlaces C-P a la estructura orgánica. Los enlaces C-P son más estables a altas temperaturas que los enlaces O-P-O de los polifosfatos. A pesar de ser efectivos contra la incrustación mediante el enmascaramiento de iones  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , también se les atribuye la inhibición de la corrosión. Algunas sustancias similares para el ablandamiento del agua contienen nitrógeno, e.g., ácido difosfónico-1,1-amino-1.

Los organofosfonatos son más efectivos y estables que el SHMP. Actúan como antiensuciantes para hierro y aluminio insolubles, manteniéndolos en solución. Los poliacrilatos (alto peso molecular) son conocidos por reducir la incrustación por silicio a través de un mecanismo de dispersión.

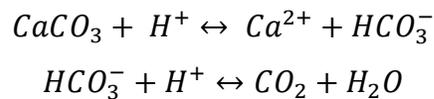
Los ácidos policarboxílicos están caracterizados por grupos -COOH y antiincrustantes y en la desalación de agua marina están usualmente basados en estructuras poliacrílicas o polimaléicas. Los antiincrustantes poliacrílicos pueden ser derivados de la co- u homopolimerización del ácido acrílico o de ésteres del ácido acrílico con otros polímeros (e.g., fosfonatos). Se piensa que estos co- o terpolímeros se desempeñan mejor en la prevención de la incrustación que los polímeros construidos a partir de un solo monómero. Los antiincrustantes polimaléicos están basados en el ácido maléico así como de sus correspondientes derivados como el anhídrido maléico y los maleatatos.

Los mismos son también ampliamente usados como polielectrolitos, especialmente los ácidos poliacrílicos y los polifosfonatos, quienes tienen que ser clasificados como antiincrustantes por un lado (capaces de capturar iones y partículas dispersas), y como polielectrolitos en el otro (capaces de aumentar la aglomeración). Los polielectrolitos no son usados en plantas EIME pero las plantas OI hacen uso de las propiedades de coagulación y dispersión de estos polímeros al mismo tiempo. La aglomeración puede ocurrir si los polielectrolitos catiónicos y los antiincrustantes aniónicos son adicionados a la corriente salobre de alimentación y, de una manera similar los cationes polivalentes como  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  o  $\text{Cu}^{2+}$  y los polielectrolitos aniónicos pueden formar un precipitado. Esto corresponde a la observación de que muchos antiincrustantes aniónicos no son efectivos en aguas ricas en  $\text{Ca}^{2+}$ , dado que ellos forman sales insolubles de calcio que hacen daño a las membranas OI así como a las superficies de los intercambiadores de calor del proceso EIME en una manera similar. Las pequeñas cantidades de  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{Mg}^{2+}$ , no reaccionan aparentemente con los ácidos polimaléicos, pero también se halló que las grandes cantidades pueden causar turbidez. Esto revela que los polímeros pueden desacelerar la aglomeración, pero que también pueden aumentar la precipitación dependiendo de su concentración. La dosis recomendada para polielectrolitos puede ser diez veces menor que aquella para los antiincrustantes poliméricos (e.g., 0.5 y 5 ppm respectivamente).

Los inhibidores orgánicos poliméricos también son más efectivos que el SHMP. Pueden ocurrir reacciones de precipitación con inhibidores cargados negativamente y polielectrolitos catiónicos o cationes multivalentes (e. g. aluminio o fierro). Debe tenerse cuidado de que no haya cantidades significativas de polímero catiónico cuando se adiciona un inhibidor de incrustación aniónico [11].

Esto ilustra que cada método, para la prevención de la incrustación, tiene que considerar el sistema completo. El  $H_2SO_4$  podría incrementar el riesgo de corrosión e incrustación de sulfato, el SHMP hidroliza fácilmente y, a causa de ello, posee nutrientes para las bacterias y facilita la incrustación de fosfato de calcio, mientras que los polímeros aniónicos pueden precipitar con los polielectrolitos catiónicos, calcio u otros cationes disueltos.

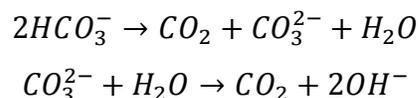
Ácidos. El agua cruda es tratada con  $CaCO_3$  y su solubilidad depende del pH. La precipitación se vuelve más probable a medida que aumenta la concentración de salmuera, pero puede prevenirse mediante la adición de ácido, manteniendo el pH de la solución debajo del de saturación. El exceso de ácido desplaza el equilibrio hacia la derecha para incrementar la solubilidad del carbonato y desprender dióxido de carbono:



Diferentes ácidos pueden ser usados, pero el tratamiento con ácido sulfúrico es más común por sus bajos costos. Por otro lado, el ácido debe ser adicionado a altas concentraciones previniendo la sobredosis.

Como el carbonato de calcio es la principal incrustación de todas las especies formadas en el agua de mar del sistema OI, un tratamiento ácido debe ser suficiente para este problema. El ácido sulfúrico sigue siendo la principal especie del pretratamiento en las plantas OI y puede ser adicionado a antiincrustantes.

La descomposición térmica del bicarbonato empieza arriba de 50 °C y los iones se degradan a 80-90 °C:



El carbonato de calcio precipita probablemente a bajas temperaturas mientras que hidróxido de magnesio se podría formar con el incremento de temperatura debido a la alta disponibilidad de los iones hidróxido que se liberan por la descomposición del  $CO_3^{2-}$  y también por la autodisociación del agua a alta temperatura. Los incrustantes alcalinos son fácilmente controlados por el agotamiento

de  $HCO_3^-$ . Este método fue aceptado en los 70's, pero tiene desventajas por lo que se busca un nuevo control de incrustaciones [13].

### Filtración con medios granulares

La desalación de agua de mar, mediante ósmosis inversa, es seriamente afectada por el ensuciamiento producido en la membrana (puede llevar a costos de operación más altos, mayor demanda de energía, incremento de la limpieza y reducción del tiempo de vida de los elementos de las membranas).

El pretratamiento es usado generalmente para reducir el ensuciamiento orgánico de las membranas de ósmosis inversa de agua de mar. Los filtros de arena y filtros de medio granular son actualmente usados para remover sólidos suspendidos; sin embargo, velocidades más altas de filtración para ambos filtros son requeridas para un mejor desempeño de los pretratamientos de filtración. La velocidad de filtración de los filtros con fibra como medio es 10 veces más alta que los de arena y los de medio granular. Los filtros con fibra como medio muestran un desempeño superior para el tratamiento de agua residual. Muchas plantas tratadoras de agua residual (más de 2 millones de  $m^3/día$ ) en Corea, aplican filtros de fibra para obtener agua tratada de alta calidad [14].

### Filtración de membrana de baja presión

La microfiltración y ultrafiltración han ganado gradualmente aceptación como el pretratamiento preferido para el sistema OI en años recientes. La UF puede remover todas las partículas suspendidas y algunos de los compuestos orgánicos disueltos, la velocidad de remoción depende de la masa molecular de las partículas y de la membrana; la capacidad de remoción típica de la UF usada para el tratamiento general de agua es 0.01 a 0.02 micrones. Algunos materiales nuevos incluso proveen 0.005 micrones. La MF típicamente opera en un tamaño de partícula en un orden de magnitud mayor que la UF, aproximadamente 0.1 a 0.2 micrones. Entonces la UF tiene ventaja sobre la MF y provee una mejor barrera de desinfección. Hasta el tamaño del poro de la UF es capaz de retener virus.

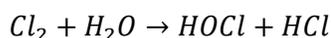
## Desinfección

El agua de mar contiene microorganismos tales como bacterias, algas, hongos y virus, que pueden causar ensuciamiento biológico. Existen varios métodos para prevenir y controlar el ensuciamiento biológico como la adición de oxidantes químicos (cloro, bromo, yodo u ozono), radiación ultravioleta, biofiltración para remover nutrientes y la adición de biocidas. Debido al riesgo de oxidación de la membrana, en el caso de la ósmosis inversa, el uso de oxidantes debe ser monitoreado cuidadosamente para mantener el cloro muy por debajo de 0.1 mg/L de cloro residual libre. A veces la decloración de la membrana es requerida a través de la adición de un compuesto de sulfito o el paso de carbón activado granular [14].

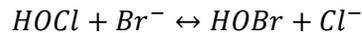
## Biocidas

Se entienden por biocidas a las sustancias activas y preparados destinados a destruir, contrarrestar, neutralizar, impedir la acción o ejercer un control de otro tipo sobre cualquier microorganismo nocivo o indeseado por medios químicos o biológicos. El límite máximo tolerable de población microbiana en sistemas se determina en pruebas de laboratorio. Cuando se conoce el dato anterior, en muchos casos, el número de bacterias y de otros microorganismos necesita ser reducido. Esto se puede lograr mediante la adición de biocidas; productos químicos que son tóxicos para los microorganismos. Los biocidas son dosificados a un sistema para reducir eficaz y rápidamente la población de los microorganismos, los cuales no pueden recuperarse fácilmente del descenso de población. Hay varios tipos de biocidas, algunos de los cuales tienen una amplia gama de efectos sobre muchas y diversas clases de bacterias. Pueden ser divididos en agentes oxidantes y agentes no oxidantes.

El cloro es comúnmente usado en los tratamientos biocidas porque, en el control de las plantas OI y EIME, inactiva los tejidos de estos microorganismos vía oxidación. Algunos usan cloro y otros usan hipoclorito de sodio o calcio por ser más manejables. La especie de cloro se hidroliza de acuerdo a las siguientes reacciones:

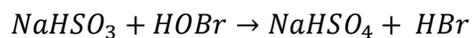


Sin embargo, el agua de mar contiene 65 ppm de bromuro que pueden desplazarse a ácido hipobromoso:



La eficiencia de desinfección del cloro depende de la cantidad de especies no disociadas y como el HOBr es el predominante en el agua de mar y se disocia a pH menor a 8, no necesita tratamiento ácido posterior, por lo que el cloro es la opción más efectiva.

Mientras que para las plantas térmicas, los niveles de cloro son rechazados con la salmuera, para el sistema OI, la decloración debe llevarse a cabo para el sistema para evitar la oxidación de la membrana, en este caso, se puede usar bisulfito de sodio (SBS) o metabisulfito de sodio, ya que es un reductor muy fuerte y reacciona con el ácido hipobromoso:



Aunque se ha demostrado que el cloro es el más efectivo, se han considerado dos efectos colaterales en agua rica en compuestos orgánicos. El primero, los compuestos como trihalometanos (THMs) que son problemáticos desde el punto de vista ambiental, y segundo, los materiales orgánicos con óxidos de cloro que se descomponen en fragmentos más pequeños que provocan disponibilidad de nutrientes para microorganismos. Muchas plantas han tenido que enfrentar crecimiento después de la cloración, es por ello que el rendimiento se mejora si se lleva a cabo una cloración intermitente.

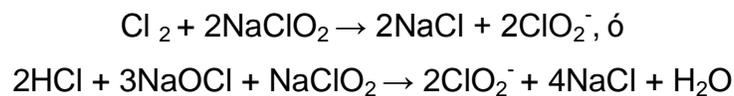
Como no se ha desarrollado otro pretratamiento fiable, el consumo del agua superficial a temperaturas cálidas es incierto actualmente sin la práctica de la cloración. El SBS que se usa como antioxidante en la decloración, también mata algunas bacterias por agotamiento de oxígeno, por lo que al final de su uso se debe realizar, cada determinado tiempo, un tratamiento adicional para restablecer el número de bacterias. La dosis recomendada es de 500-1000 ppm por 30 min cada 24 horas, pero el SBS podría ser usado continuamente hasta niveles de 50 ppm; sin embargo, como algunas bacterias pueden sobrevivir en medios anaerobios entonces se proponen otros biocidas como  $I_2$  o  $H_2O_2$ , pero las membranas tampoco deben exponerse a altas dosis de

estos compuestos. Desafortunadamente no existe información sobre cómo desinfectar la salmuera de los residuos de estos compuestos.

La cantidad de cloro que necesita ser agregada para el control del crecimiento bacteriano viene determinada por el pH. Cuanto más alto es el pH, más cloro es necesario para matar a las bacterias indeseadas en un sistema de agua. Cuando los valores de pH están dentro de una gama de 8 a 9, se deben agregar 0.4 ppm de cloro. Cuando los valores de pH están dentro de una gama de 9 a 10, se deben agregar 0.8 ppm de cloro.

Otros ejemplos de biocidas oxidantes son:

Dióxido de cloro. El dióxido de cloro es un biocida oxidante activo, eso lo hace ser el más aplicado y más aún porque tiene efectos menos perjudiciales para el ambiente y la salud humana que el cloro. No forma ácidos hipoclorosos en agua; existe como dióxido de cloro disuelto, un compuesto que es un biocida más reactivo en gamas más altas de pH. El dióxido de cloro es un gas explosivo, y por lo tanto tiene que ser producido o ser generado in-situ, por medio de las reacciones siguientes:

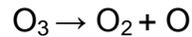


Isocianatos de cloro. Estos son los compuestos organo-clorados que en hidrólisis dan el ácido hipocloroso y ácido cianhídrico en agua. El ácido cianhídrico reduce la pérdida de cloro debido a las reacciones fotoquímicas con la luz ultravioleta, de modo que más ácido clorhídrico se origina y la acción biocida se ve realizada.

Hipoclorito. El hipoclorito es la sal del ácido hipocloroso. Se formula en varias formas. El hipoclorito se aplica generalmente como hipoclorito de sodio, NaClO, e hipoclorito de calcio, Ca(ClO)<sub>2</sub>. Estos compuestos se pueden aplicar como biocidas. Funcionan de la misma manera que el cloro, aunque son algo menos eficaces.

Ozono. El ozono es naturalmente inestable. Puede ser utilizado como agente oxidante de gran alcance, cuando se genera en un reactor. Como un biocida actúa de la misma manera que el

cloro; dificulta la formación del ATP, de modo que la respiración de la célula de los microorganismos se hace difícil. Durante la oxidación con ozono, las bacterias mueren generalmente por pérdida del citoplasma que sostiene la vida. Mientras que el proceso de oxidación ocurre, el ozono se divide en oxígeno diatómico y un átomo de oxígeno, que se pierde durante la reacción con los líquidos de la célula de las bacterias:



Algunos de los factores que determinan la cantidad de ozono requerida durante la oxidación son pH, temperatura, compuestos orgánicos, solventes y productos acumulados de la reacción.

El ozono es más respetuoso con el medio ambiente que el cloro, porque no agrega el cloro al sistema del agua. Debido a su descomposición, el oxígeno no dañará la vida acuática. Generalmente 0.5 ppm de ozono se agregan a un sistema de agua, sobre base continua o intermitente.

Como ejemplos de biocidas no oxidantes, se tienen:

Acroleína. La acroleína es un biocida extremadamente eficaz que tiene una ventaja ambiental sobre los biocidas que oxidan, porque pueden ser desactivados fácilmente por el sulfito de sodio antes de la descarga en una corriente de recepción. La acroleína tiene la capacidad de controlar la población de algas, plantas acuáticas, bacterias y moluscos del agua. Se alimenta generalmente a los sistemas de agua, cuando está ligeramente alcalina, como gas en cantidades de 0.1 a 0.2 ppm. La acroleína no se usa muy frecuentemente, porque es extremadamente inflamable y también tóxica.

Aminas. Las aminas son surfactantes que pueden actuar como biocidas debido a su capacidad de matar a los microorganismos. Éstas pueden potenciar el efecto biocida de los compuestos fenólicos clorados cuando son adicionados al agua.

Fenoles tratados con cloro. Los fenoles clorados, a diferencia de los biocidas oxidantes, no tienen un efecto sobre la respiración de los microorganismos; sin embargo, ellos inhiben el crecimiento. Los fenoles clorados primero se adsorben a la pared celular de los microorganismos por

interacción con enlaces de hidrógeno. Después de la adsorción por la pared celular, se difundirán dentro de la célula, donde quedarán en suspensión y precipitarán las proteínas. Debido a este mecanismo el crecimiento de los microorganismos es inhibido.

Sales de cobre. Las sales de cobre se han utilizado como biocidas durante mucho tiempo, pero su uso se ha limitado en los años recientes debido a las preocupaciones por la contaminación de metal pesado. Se aplican en cantidades de 1 a 2 ppm. Cuando el agua a tratar está situada en los tanques de acero las sales de cobre no se deben aplicar, debido a su capacidad de corroer el acero. Las sales de cobre no se deben utilizar en el agua que será aplicada como agua potable, porque son tóxicas para los seres humanos.

Compuestos órgano-sulfúricos. Los compuestos órgano-sulfúricos actúan como biocidas inhibiendo el crecimiento de la célula. Hay una gran variedad de compuestos órgano-sulfúricos que funcionan en diversas gamas de pH. La energía se transfiere normalmente en células bacterianas cuando el hierro se reduce de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ . Los compuestos órgano-sulfúricos quitan el  $Fe^{3+}$  por acomplejamiento como sal de hierro. La transferencia de la energía a través de las células produce inmediatamente la muerte de la célula.

Sales cuaternarias de amonio. Las sales cuaternarias de amonio son los productos químicos tensoactivos que consisten en un átomo de nitrógeno, rodeados por los grupos substitutivos que contienen de ocho a veinticinco átomos de carbón en cuatro perspectivas del átomo de nitrógeno. Estos compuestos son, generalmente, los más eficaces contra bacterias en gamas alcalinas de pH. Se cargan y se enlazarán positivamente a los sitios cargados negativamente, en la pared bacteriana de la célula. Estos enlaces electrostáticos causarán a las bacterias tensiones en la pared de la célula. También causan daño al flujo normal de compuestos que sostienen la vida a través de la pared de la célula al paralizarlos, disminuyendo su permeabilidad. El uso de las sales cuaternarias de amonio es limitado, debido a su interacción con el aceite cuando está presente y debido al hecho de que pueden causar ensuciamiento. En muchos casos los agentes oxidantes no son biocidas eficaces y los agentes que no oxidan tienen que ser aplicados.

Desinfectantes alternativos han sido propuestos para las plantas OI, cloraminas y sulfatos de cobre. Las cloraminas son producidas con cloro en contacto con agua rica en amonio y son menos reactivas que el cloro por lo que no degradan a los compuestos orgánicos. No obstante, el SBS debe ser adicionado para proteger la membrana de la dechloración pero no es necesario para

biocidas no oxidantes como el sulfato de cobre. Una mejora en el control de crecimiento biológico ha sido reportada para el tratamiento del mar rojo desde 1986; sin embargo, ninguna dosis ha sido especificada pero el sulfato de cobre puede ser adicionado hasta 0.1-0.5 ppm. Además los iones de cobre pueden precipitar como carbonatos o hidróxidos por ello el uso de estos biocidas ha sido restringido en algunos países [15].

### Agentes antiespumantes

La espuma es una capa de líquido globular enclaustrando vapor o gas. Las espumas son como las emulsiones en que capas de adsorción rodean la fase dispersa en ambos sistemas. Sin embargo, las espumas difieren de las emulsiones en dos aspectos: la fase dispersa es un gas en las espumas y un líquido en las emulsiones; las burbujas de gas de las espumas son mucho más grandes que los glóbulos en las emulsiones. Las espumas son sistemas coloidales por la delgadez de las capas que rodean las burbujas de gas.

La espuma se forma al quedar atrapadas burbujas de aire producidas durante las diversas fases del proceso de desalación, como el bombeo y la agitación. Durante este proceso, las burbujas pequeñas se pueden combinar para formar otras más grandes que suben a la superficie rápidamente. Las burbujas se acumulan en ella deformándose a sí mismas y el aire queda atrapado por la formación de una lamela (base estructural de la espuma) estabilizada por la presencia de los agentes antiespumantes. Sin ellos, las burbujas afectarían el funcionamiento de los equipos empleados en la desalación.

El mercado ofrece varios tipos de antiespumantes, cada uno de ellos depende de la naturaleza del sistema; están aquellos constituidos a base de disolvente y agua, éstos están combinados con flúor lo que provoca una disminución aún mayor de la tensión superficial. También los de tipo tradicional a base de aceites minerales y siliconas; éstos son muy fuertes y, en ocasiones, encontrar la dosis correcta puede ser complicado, para eso se recomienda realizar pruebas mediante agitación para encontrar la medida justa. Los antiespumantes convencionales se utilizan mediante dilución de agua, se recomienda agitar el contenido previamente y luego diluirlo con tres a diez partes de agua; esta emulsión se encarga de controlar la espuma aniónica y catiónica y puede utilizarse en una amplia gama de rangos de pH.

Los antiespumantes son comunes en las plantas EIME pero no en sistemas OI, aunque para este último algunos químicos tienen la misma actividad superficial y propiedades dispersantes. En este caso se adicionan para prevenir la espuma provocada por los compuestos orgánicos debido al proceso de excreción y degradación del fitoplancton, como son compuestos orgánicos, se deben escoger adecuadamente para no provocar espuma o incrementar la tensión superficial del agua de mar, además se requiere que se encuentren en un rango de temperatura sobre los 30 °C hasta 110 °C en la salmuera más caliente y eso debería ser compatible con otro tratamiento químico.

Un ejemplo de antiespumante son los poliglicoles y sus propiedades químicas se determinan por su masa molecular, en relación al número de grupos hidroxilo terminales. Son muy solubles en solventes orgánicos como el agua, son resistentes a la hidrólisis pero sensibles a los agentes oxidantes como cloro a altas temperaturas. La dosificación y naturaleza química son raras en la operación de plantas pero la adición de 0.1 ppm es efectiva. Las concentraciones de la descarga están a mitad de nivel debido a la mezcla de agua fría con salmuera. Mientras que la salmuera tiene antiespumantes, el agua fría no es tratada y se reduce el rango de la concentración de descarga.

Cabe resaltar que los antiespumantes no se emplean en muchos procesos industriales; la mayoría de ellos se componen de emulsión de silicona de gran estabilidad y son diluibles en agua; estos productos pueden aplicarse en todos los sistemas acuosos que generan espuma y son de gran efectividad ya sea en condiciones neutras, alcalinas o ácidas. En el 80% de los casos, estos productos se incorporan directamente en el medio a utilizar requiriendo únicamente una agitación suficiente para lograr una completa dispersión. Se sugiere comenzar aplicando una concentración de 50 a 100 ppm; es importante remarcar que estos productos no son muy nocivos para el medio ambiente o los individuos, son biodegradables, no abrasivos, no corrosivos y tampoco inflamables.

### Control de la corrosión

La corrosión se define como el deterioro de un material, generalmente metálico, a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (rédox), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en

contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión. Otros factores que afectan la velocidad de estas reacciones son las alteraciones químicas de los metales a causa del aire, como la herrumbre del hierro y el acero o la formación de pátina (capas o películas superficiales que representan el estado de envejecimiento de un material) verde en el cobre y sus aleaciones (bronce, latón).

La corrosión es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes (ruptura de una pieza) y, además, representa un costo importante, ya que se calcula que cada pocos segundos se disuelven 5 toneladas de acero en el mundo, procedentes de unos cuantos nanómetros o picómetros, invisibles en cada pieza, pero que multiplicados por la cantidad de acero que existe en el mundo, constituyen una cantidad importante.

Para controlar la corrosión en plantas EIME, los niveles de oxígeno deben reducirse a aproximadamente 110 ppb mediante desaereación física, que también agota el  $\text{CO}_2$  desde la corriente de alimentación hasta la sección de recuperación de calor. Los niveles de  $\text{O}_2$  pueden ser posteriormente reducidos hasta cerca de 20 ppb mediante la reacción con carroñeros de oxígeno como SBS, que es transformado a sulfato de sodio. La depuración del oxígeno es esencial para los intercambiadores de calor de Cu-Ni en plantas EIME para limitar la corrosión en soluciones ácidas aereadas.

Otra medida preventiva contra la corrosión involucra la adición de sustancias que forman una película protectora por dentro de los tubos. Por ejemplo, el sulfato ferroso ( $\text{FeSO}_4$ ) se hidroliza y oxida al  $\text{FeO}(\text{OH})$  coloidal, el cual se adhiere a la superficie de los tubos del condensador. El control de la corrosión es aún más importante durante la limpieza de las plantas EIME.

Para concluir, la corriente salina de descarga deberá estar completamente depurada de oxígeno mientras los inhibidores químicos estén presentes. Dado que la corrosión no puede ser completamente prevenida, los metales deberán pasar por la corriente salina como  $\text{Ni}^{2+}$  o molibdato  $\text{MoO}_4^{2-}$ . Los cromatos pueden permanecer en la corriente tanto en Cr-VI (en soluciones ácidas de limpieza) como en el estado Cr-III (en ambientes alcalinos, con agua marina ligeramente alcalina). Debido a que estas sustancias son componentes minoritarios de la mezcla de metales, sus contrapartes en la corriente salina serán comparativamente raras. Debe esperarse que diferentes especies de cobre y acero sean más abundantes.

## **CAPÍTULO 3**

### **COSTOS DE LOS PROCESOS DESALADORES**

En general, los costos de las plantas OI tienden a ser más bajos que las plantas de destilación de una capacidad similar, pero particularmente para plantas menores que 300 a 400 m<sup>3</sup>/día donde la destilación no es financieramente factible. La destilación sólo es viable para plantas de más alta capacidad, y particularmente donde a bajo costo, haya disponible calor proveniente de fuentes residuales de alta calidad.

La Corporación de Agua (2000) ha convertido un conjunto de curvas de costos genéricos de la Asociación Internacional de Desalación (1999) para la mayor parte de los procesos de desalación en términos de dólares Australianos. Estos costos incluyen valores para la inversión del capital y los costos de operación. Éstas curvas permiten una estimación aproximada del costo por metro cúbico de agua producto en plantas de diferente capacidad, aunque debería ser notado que los costos para plantas más pequeñas no son considerados. A pesar de esto, conclusiones como que las plantas de OI tienden a costar menos que las plantas de destilación, y la desalación usando alimentaciones de menor salinidad en plantas de alta capacidad es más barata.

En general, es claro que sin escenarios altamente específicos de desalación, un análisis económicamente definitivo no es posible usando la metodología preferida [18]; no obstante, para fines prácticos, se usarán los datos proporcionados en [19] para entender la tendencia de los costos.

Una evaluación económica completa de las plantas desaladoras, normalmente utiliza un método de flujo de caja (tal vez incorporando valores no comerciales) para una variedad de escenarios de plantas desaladoras totalmente definidas "con" y "sin" los escenarios de las planta de desalinización comenzando desde el punto de abastecimiento de agua a través de la disposición de la salmuera y la entrega a los usuarios. Todos los costos asociados con el agua desalada incluyen:

- Costos de extracción del agua desalada;
- Abastecimiento de energía y costos;
- Costos de localización de planta (v.gr. lejanía, disponibilidad de mano de obra, etc);

- Costos de protección ambiental (costos de disposición de la salmuera, las licencias de emisiones);
- Distribución y pérdidas en el sistema de almacenamiento y distribución.
- Requerimientos del postratamiento;
- Entrega de agua producto y residual a los usuarios;
- Requerimientos de infraestructura civil (caminos, edificios, etc);
- Requerimientos auxiliares de la obra, incluyendo tanques de almacenamiento, con la tubería y suministro de energía asociados;
- Disponibilidad de mano de obra y
- Fiabilidad de la planta.

La siguiente sección utiliza los costos de operación y construcción como la base de la comparación y calcula el impacto de éstos para cambios en sólo dos de las más importantes variables: salinidad del agua de alimentación y flujo del agua producto. Se asume que todos los demás factores son iguales y son ignorados, aunque es proporcionada una discusión cualitativa detallada sobre cómo estos factores podrían influenciar los costos reales.

Para comparar la inversión de las 3 principales tecnologías, sólo los costos directos de capital asociados con el proceso de obra, que incluyen el pretratamiento y el equipo de proceso de tratamiento, bombas, tuberías y sistemas de control, son incorporados.

Para la comparación de los costos de operación, sólo los costos asociados con la desalación del agua son incorporados, y no los costos por la entrega del agua a la planta y de la planta al usuario, o asociados a los costos de postratamiento. Los costos de operación que son considerados en este análisis, incluyen los asociados con la energía, el reemplazo anual de equipos, químicos, mantenimiento y toda la mano de obra. Las incertidumbres que rodean el momento de determinar los costos de operación significan que el promedio anual de costos de operación para cada tecnología es obtenido promediando el total de costos de operación esperados durante la vida típica esperada de la planta.

### **3.1. Principales factores que afectan los costos de la desalación**

#### **3.1.1. Fuente de energía**

Todas las tecnologías de desalación requieren alguna entrada de energía para facilitar la separación del agua producto de baja salinidad del agua de alimentación salina. La forma de la energía disponible, los costos asociados y las limitaciones ambientales relacionadas a la fuente de energía, jugarán un rol mayor en la selección de la tecnología de desalación.

##### Energía Eléctrica

Todos los procesos de desalación usan energía eléctrica. Procesos tales como OI, ED<sup>3</sup> y CV<sup>4</sup>, usan energía eléctrica como fuente primaria de energía, tanto para el proceso de desalación como para manejar los equipos auxiliares como bombas de transferencia. Mientras que los procesos de destilación tales como EME y EIME usan electricidad como fuente secundaria de energía, para manejar la recirculación y bombas de transferencia únicamente.

##### Energía térmica

La mayoría de los procesos de desalación, además de CV, EIME y EME, usan energía térmica exclusivamente en forma de vapor como fuente primaria de energía. La energía térmica puede provenir de diferentes fuentes, y típicamente es asociada con corrientes de calor residual en los complejos industriales existentes, tales como turbinas de gas, procesos industriales calentados con combustibles fósiles, incineradores de sólidos residuales y otras fuentes de calor residual.

##### Energía renovable

Fuentes de energía renovable que producen calor o energía eléctrica se pueden usar para las plantas de desalación (ambas OI y destilación) o para aumentar el uso de fuentes tradicionales de energía.

---

<sup>3</sup> Siglas para en Español para el proceso de Electrodialisis

<sup>4</sup> Siglas para en Español para el proceso de Compresión de Vapor

## Salmueras geotérmicas

La perforación de pozos artesianos (aquel tipo de manantial o pozo que comunica con un acuífero cautivo de agua (o petróleo)) para localizar agua caliente (aproximadamente a 80 °C), puede proveer una fuente de energía para el esquema de la desalación térmica. Además, el uso de agua de alimentación calentada naturalmente, puede reducir los costos asociados con las técnicas de desalación térmica.

## Bioenergía

La bioenergía (energía producida por la descomposición de la materia orgánica, por ejemplo, residuos verdes, residuos sólidos municipales, etc) es una fuente potencial de energía que podría ser utilizada para las plantas desaladoras.

Con el fin de mantener un alto nivel de suministro de energía a lo largo del año, un volumen sustancial y un suministro seguro de biomasa son requeridos. Este requerimiento, y los costos de implementación de la tecnología de recuperación de energía, pueden ser prohibitivos para la producción de bioenergía en áreas fuera de las grandes ciudades o donde no hay actividades comerciales o industriales produciendo cantidades significativas de subproductos de los residuos orgánicos.

### **3.1.2. Fuente de agua de alimentación**

La fuente de agua de alimentación es significativa en la selección de la tecnología de desalación. Las fuentes más comunes son:

- Agua de mar.
- Agua salobre.
- Perforaciones salinas.
- Efluentes.

En casi todos los casos donde un proceso térmico es escogido, el agua de mar es la fuente de alimentación. Mientras que el proceso OI puede ser usado para aplicaciones del agua de mar, y es

frecuentemente usado cuando fuentes de calor residual no están disponibles, además de fuentes salobres de alimentación y efluentes de reuso.

### Localización

La localización de la fuente de alimentación dictamina la viabilidad de una planta desaladora con referencia a lo siguiente:

- Lejanía – los costos del transporte de agua de y hacia, el costo de la energía para transferirla y la infraestructura podrían disminuir la viabilidad; y
- Limitaciones ambientales – la localización de la fuente podría dictaminar que ciertas limitaciones ambientales serían impuestas, por ejemplo: ruido, disposición de la salmuera, sistema de flujo de las aguas subterráneas y rendimiento acuífero, disturbios a la vida marina, la ecología del fondo marino, etc, que podrían disminuir la viabilidad del proyecto.

Mientras más lejos esté la alimentación de agua de la planta, más altos serán los costos de construcción y operación asociados.

### Cantidad de alimentación de agua

La cantidad de rendimiento de la fuente, la capacidad total de entrega, y la capacidad para extraer una cantidad económicamente justificable de alimentación de agua son todos factores importantes en el estudio de la viabilidad de una planta desaladora y la tecnología a ser aplicada.

### Calidad de la alimentación

La calidad de la alimentación dictaminará fuertemente la tecnología seleccionada. En general, las tecnologías de destilación tienden a ser más flexibles que las de membrana con alimentaciones que tienen fluctuaciones en la calidad de la alimentación. Además, la calidad de la alimentación que requiere pretratamiento extensivo tendrá un impacto significativo en la viabilidad de la planta.

Los parámetros clave de la calidad del agua en el diseño del pretratamiento y procesos principales son:

- Salinidad (TSD).
- Turbidez.
- Contenido orgánico.
- pH.
- Concentración de la incrustación formando sales y especies ensuciantes no iónicas.

### Necesidades de pretratamiento y postratamiento

Como se dijo anteriormente, el diseño del pretratamiento es crucial para una operación exitosa de los sistemas. Las dos consideraciones importantes son para el pretratamiento de las plantas desaladoras, los requerimientos de filtración y aseguramiento de la prevención de incrustación.

Los postratamiento de cloración, desinfección UV y ajuste de pH podrían ser considerados, dependiendo de la calidad del producto final.

#### **3.1.3. Disponibilidad de tierra**

Generalmente, las plantas de desalación no requieren grandes áreas de tierra para la instalación de la planta. Idealmente las tierras deberían estar localizadas tan cerca como sea posible de la fuente de agua de alimentación y los servicios necesarios con el fin de minimizar los costos. Las grandes plantas de OI, requieren típicamente un área sobre el cuál establecerse como la de las plantas de destilación con la misma capacidad de producción. El área necesaria para plantas de destilación de baja capacidad sería más grande que la capacidad equivalente de las plantas OI para capacidades menores a 10,000 m<sup>3</sup>/día. Además, puede ser necesario que se ajuste el tamaño del área en función de los requerimientos de almacenamiento, oficinas y laboratorios, etc.

#### **3.1.4. Disposición del concentrado/salmuera**

El subproducto de todos los procesos de desalación es el agua altamente concentrada de los elementos removidos durante el proceso, llamada salmuera. Esto incluye sales disueltas, pero también cualquier tratamiento químico que es usado en los procesos de desalación para controlar la formación de incrustación mineral y crecimiento biológico y otras causas de ensuciamiento.

Dependiendo del contenido físico o químico, la salmuera puede a veces ser regresada, sin tratamiento o diluida, a su fuente de origen o un cuerpo cercano de agua (por ejemplo, desagüe al mar o un sistema de agua superficial, o inyectándolo a un acuífero salino). Estas opciones son generalmente las más baratas y fáciles de implementar, particularmente si la planta desaladora está localizada cerca del mar. El costo del bombeo, la construcción de las tuberías y/o orificios, junto con la operación y el mantenimiento de esta infraestructura, son los únicos elementos con costos significativos.

Todos los puntos mencionados arriba pueden sumarse significativamente al costo del proceso, y así el método de disposición de la corriente de salmuera debería ser uno de los primeros elementos en ser investigados en la determinación de la factibilidad de una planta. El costo de disposición puede ser significativo, tanto como para afectar la economía del proceso haciéndolo inviable.

Los permisos ambientales son requeridos usualmente para la disposición de la salmuera, particularmente la descarga en cuerpos de agua superficiales, y estos permisos son emitidos con condiciones rigurosas. Sin embargo, en algunos casos tales como áreas particularmente sensibles al ambiente, las regulaciones ambientales estatales y federales y las expectativas sociales prevén cualquier disposición, limitando las opciones y factibilidad de la planta.

## 3.2. Análisis comparativo de los sistemas OI

### 3.2.1. Análisis de la inversión<sup>5</sup>

Tabla 1. Inversión OI a diferentes valores de salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN)<sup>6</sup> [20]

Flujo del agua producto	5 m <sup>3</sup> /día	15 m <sup>3</sup> /día	50 m <sup>3</sup> /día
Salinidad de la alimentación = 2000 mg/L TSD	\$67,487	\$175,466	\$472,409
Salinidad de la alimentación = 10000 mg/L TSD	\$94,482	\$236,205	\$593,886
Salinidad de la alimentación = 35000 mg/L TSD	\$161,969	\$364,430	\$1,147,279

#### Suposiciones:

Suministro de energía eléctrica disponible

Pre-filtración básica incluida

Los costos indicados son sólo para la planta – i.e. no de obra civil, tanques externos ni tuberías

#### Factores que influyen en la inversión

##### *Fuente de alimentación*

Sólidos disueltos totales (TSD). Es el término usado para describir los niveles de material disuelto en el agua y es usualmente sólo usado para proveer de “un vistazo” indicadores de las características del agua. Al evaluar la idoneidad para una aplicación, se requiere un detallado análisis del agua de alimentación.

<sup>5</sup> Para la comparación de la inversión, construcción e instalación para los 3 procesos principales, sólo los costos directos de capital asociados con los procesos, incluyendo pre-tratamiento y equipo del proceso de tratamiento, bombas, tuberías y sistemas de control, son incorporados.

<sup>6</sup> Las tablas de la literatura para la inversión y costos de operación tanto de los procesos térmicos como de la OI se encontraron reportadas en términos de dólares australianos; sin embargo, para una mejor comprensión, se convirtieron a pesos mexicanos con el valor 13.4974 MXN = 1 AUD.

El TSD es usado en la Tabla 1 para proveer una base de comparación de los sistemas OI operando con alimentaciones a diferentes concentraciones. Se muestra también el efecto dramático que el incremento en TSD tiene en la inversión requerida para la planta.

- Entonces la regla es: Mientras todos los factores son constantes, el decremento en el TSD de la alimentación es igual a decremento en la inversión.

Química de la alimentación y relación de recuperación. La tasa de recuperación es la proporción de agua producida (permeado) por alimentación de planta OI. Para un flujo dado de permeado, un sistema con alta tasa de recuperación tiene un flujo de alimentación más bajo que un sistema con tasa baja. Teóricamente, esto significa que con sistemas con alta recuperación cuesta menos producir que con sistemas con recuperación baja debido a bombas más pequeñas, menores tuberías, y (quizá) menos elementos de la membrana. En la práctica, cuestiones relacionadas con las características de la alimentación tienden a sesgar esta relación.

El proceso OI, concentra progresivamente la alimentación mientras el agua producto es extraída. Cuanto mayor sea la tasa de recuperación, más alta es la concentración. Si la concentración excede el nivel de saturación de la alimentación constituyente, precipitará dentro de las membranas. Por esta razón, es importante conocer los componentes de la alimentación y la concentración en la que se vuelven saturados. Un diseño sensible dicta una tasa de recuperación que, o bien evita la saturación de los componentes del agua de alimentación o permite que se produzca cierta saturación, pero la precipitación posterior se logra mediante el uso de productos químicos antiincrustantes.

Adicionalmente, una mayor salinidad de la alimentación lleva a una mayor presión de operación del sistema OI. En este caso, el beneficio de una alta tasa de recuperación debe ser cuidadosamente balanceado contra el costo de producirla de tal manera que la presión de operación requerida del sistema OI puede ser prohibitiva.

- La regla aquí es: Una tasa de recuperación máxima dentro de los límites de las características del agua de alimentación reduce la inversión.

Sólidos suspendidos totales (TSS) y turbidez en la alimentación. TSS es el término usado para describir los niveles de material suspendido en el agua y sus unidades son mg/L. Usualmente, TSS es considerado simultáneamente con la turbidez, que indica el tamaño y la cantidad de partículas suspendidas, en el diseño de sistemas de pretratamiento OI.

La alimentación de un sistema OI debe estar virtualmente libre de sólidos suspendidos. La cantidad y características de los sólidos de la alimentación indicarán el mecanismo de remoción. Donde las alimentaciones puedan demostrar muy bajos niveles de sólidos suspendidos, la filtración mínima, tal como cartuchos desechables, puede ser usada.

Mientras aumenta el nivel de sólidos suspendidos, una mejor prefiltración es requerida. Esto es típicamente un filtro de lavado a presión o filtro de autolimpieza seguido por los cartuchos anteriores. Esto aumenta entre un 10 y 15% más la inversión de los sistemas de OI que el de los cartuchos solos.

Además un incremento en el nivel de sólidos suspendidos podría requerir la instalación de un tanque, con un paso de adición de floculantes, antes de los otros pasos de prefiltración. Esto adiciona aproximadamente de 20 a 35% a la inversión de los sistemas OI que sólo usan cartuchos desechables, descritos arriba.

Finalmente, si el material suspendido es de naturaleza fina y variante en cantidad, de modo que no puede ser químicamente estable y pasará a través de los filtros convencionales, una planta de membrana de microfiltración (MF) o ultrafiltración (UF) podría ser requerida. Esto adiciona de 60 a 80% a la inversión del sistema RO que sólo usa los cartuchos desechables.

- La regla aquí es: Mientras todos los demás aspectos se mantengan igual, un decremento en el TSS de la alimentación provoca un decremento en la inversión.

### *Especificación del producto*

Las plantas OI remueven una proporción (usualmente 97-99%) de los sólidos disueltos en la alimentación y algunos de los sólidos remanentes en el producto. La tasa de remoción actual (rechazo) es una función de la composición de la alimentación, el tipo de membrana, su

configuración y las condiciones de operación del sistema OI. Los rechazos altos (+99.5%) sólo pueden ser logrados usando membranas de alto rechazo más costosas o retratando el producto en un paso adicional de desalación que también eleva la inversión.

A la inversa, si rechazos más bajos (65-75%) son aceptables, algo de la alimentación puede ser desviado alrededor del sistema OI y mezclado con el permeado. Esto reduce efectivamente el tamaño del sistema OI y reduce los costos.

- La regla aquí es: La capacidad de aceptar permeados de menor calidad, reducirá la inversión.

### 3.2.2 Análisis de los costos de operación<sup>7</sup>

**Tabla 2. Costos de operación OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m<sup>3</sup>) [20]**

Flujo del agua producto	5 m <sup>3</sup> /día	15 m <sup>3</sup> /día	50 m <sup>3</sup> /día
Salinidad de la alimentación = 2000 mg/L TSD	\$13.5	\$12.1	\$8.8
Salinidad de la alimentación = 10000 mg/L TSD	\$20.2	\$17.5	\$12.6
Salinidad de la alimentación = 35000 mg/L TSD	\$29.7	\$27.0	\$25.5

Suposiciones:

Costo de energía eléctrica: =1.9 MXN/kW h

Sólo se toma en cuenta el costo para desalinizar el agua, no se incluye el costo de entrega a la planta y el costo de entrega al usuario.

Los costos de operación suponen una prefiltración básica.

<sup>7</sup> Para la comparación de los costos de operación, sólo los costos asociados con la desalación son incorporados, y no los costos por entregar el agua de la planta hacia afuera o de afuera hacia la planta, o los costos asociados al pretratamiento. Los costos considerados son los asociados con la energía, reemplazo anual del equipo, químicos, mantenimiento y todo el trabajo.

Los costos de operación fueron calculados y promediados sobre el tiempo de vida esperado para las plantas OI.

### Factores que influyen en los costos de operación

#### *Energía*

El consumo de energía eléctrica es usualmente el más significativo de los costos de operación en las plantas OI. Los temas que afectan el consumo de energía son:

Salinidad de la alimentación. Altas salinidades requieren más altas presiones de bombeo y más altos flujos de alimentación. El consumo de energía incrementa de acuerdo a la Tabla 2.

Menor salinidad = Menor consumo de energía

Pretratamiento. Mientras más grande sea el número de etapas de pretratamiento, más energía es consumida. Esto resulta debido a la pérdida de carga que usualmente ocurre durante cada etapa de pretratamiento y los requerimientos de bombeo asociados.

Menos pretratamiento = menor consumo de energía

Selección de la membrana. Algunas membranas, particularmente aquellas designadas para aplicaciones de baja salinidad, operan a presiones más bajas y entonces requieren menos energía de bombeo.

Optimizar el tipo de membrana = Menor consumo de energía

Elevación. La colocación estratégica de los componentes del pretratamiento y/o del propio sistema OI, en varios puntos en un gradiente, haciendo uso de la cabeza disponible naturalmente, pueden reducir los requerimientos de bombeo y entonces el consumo de energía.

En el diseño, se debe tomar ventaja de la presión disponible naturalmente, por ejemplo, la elevación.

Sistemas de recuperación de energía. Podrían ser usados para reducir el consumo total de energía de los sistemas OI. Esto se logra usando la disminución de energía del sistema OI para

complementar el bombeo de las plantas OI. Típicamente esto es más efectivo en plantas que operan a altas presiones y bajas tasa de recuperación ya que estas condiciones hacen que haya disponible más energía para la recuperación.

Los sistemas de OI requieren presión para operar. La presión se desarrolla bombeando el agua que será desalada a través de una válvula de control de presión que comprime el flujo. La membrana del sistema OI está hidráulicamente localizada entre la bomba y la válvula de control de presión y es entonces sometida a la presión desarrollada.

Un sistema de recuperación de energía sustituye una boquilla o tobera por una válvula de control de presión. La tobera está diseñada para proveer la misma presión que la válvula de control de flujo. La alta velocidad de la corriente en la descarga de la tobera es dirigida a la turbina que está localizada en un eje común a la bomba del sistema OI. La turbina, que es impulsada por agua a alta velocidad, introduce energía a la bomba, reduciendo la demanda de energía eléctrica de la misma. El paquete tobera-turbina se conoce como un sistema de recuperación de energía.

Típicamente, la instalación de un sistema de recuperación de energía en una planta desaladora puede adicionar el 30% de la inversión, pero puede reducir el consumo de energía hasta en un 50%.

### *Reemplazo de la membrana*

Aunque los elementos de la membrana OI generalmente no deberían ser considerados como consumibles, tienen un tiempo de vida finito. Este tiempo de vida tiene un impacto significativo en los costos de operación. El tiempo de vida esperado de los elementos de la membrana OI es 2-5 años, por lo tanto, los costos anuales de operación, asociados con el reemplazo de los elementos de la membrana podrían ser de miles o diez miles de dólares. Claramente, el maximizar el tiempo de vida de la membrana es esencial para la gestión global de los costos de operación.

Además, un agua de alimentación con un alto potencial de ensuciamiento o incrustación, y donde un pretratamiento inapropiado es empleado reducirá el tiempo de vida de la membrana. Los incrustantes y ensuciantes más comunes son, en cierta medida removibles por limpieza; sin embargo, siempre hay una proporción de remanentes en los elementos y acumulados en el

tiempo. La acumulación de ensuciantes/incrustantes reduce la permeabilidad de los elementos de la membrana y reduce el flujo total del producto.

Bajo ensuciamiento/incrustación en la alimentación = Bajo costo de reemplazo de la membrana

### *Uso de químicos*

La mayoría de los sistemas de Ósmosis Inversa usan productos químicos con el fin de:

- Pretratar el agua de la alimentación.
- Limpiar los elementos de la membrana.
- Desinfectar los elementos de la membrana.

Éstos químicos tienen un impacto significativo en los costos de operación.

Optimizar el uso de los químicos para una aplicación específica, con el fin de reducir los costos de operación.

### *Cartuchos de prefiltración*

El reemplazo de los cartuchos de filtración influencia no sólo sus propios costos, sino que también influye en los costos de reemplazo de la membrana. Su propósito primario es pulir el agua de alimentación antes de que entre a las membranas OI. Usualmente, el tipo óptimo de cartuchos es aquél que provee la detención del tamaño de partícula más pequeño mientras que mantiene la buena capacidad de detener la suciedad del agua.

Una vez más, es esencial probar diferentes tipos de filtros ya que cada uno tiene sus ventajas en diferentes aplicaciones. El método de selección más apropiado es tomar medidas del TSS antes y después de los filtros y medir la rapidez del incremento de la presión diferencial. Pesarse los filtros cuando son nuevos y cuando están a la máxima presión diferencial puede indicar la máxima retención de sólidos.

## *Mantenimiento*

Un mantenimiento correcto y oportuno de los sistemas OI es esencial. Un buen régimen de mantenimiento ayuda a la gestión de los costos asociados a la producción insuficiente de agua. El mantenimiento involucra la limpieza química de las membranas, mencionada anteriormente, la recalibración de las bombas dosificadoras, la recalibración de instrumentos, la comprobación de la vibración o desgaste de los equipos rotativos y hacer los ajustes para compensar la variabilidad del agua de alimentación.

En última instancia, reduce el costo de reemplazo de la membrana, optimiza el uso de agentes químicos y asegura la producción de agua.

## *Costo del agua de alimentación*

Debidas consideraciones deben ser dadas al costo de entrega del agua de alimentación a la planta OI. Los costos deben incluir:

- Creación de perforaciones para alimentar el agua.
- Instalación, operación y control de las bombas de transferencia.
- Obras civiles tales como tuberías, estaciones de transferencia.
- Mantenimiento del equipo.

### 3.3. Análisis comparativo de los sistemas EME y EIME

#### 3.3.1 Análisis de la inversión

**Tabla 3. Inversión por salinidad de agua de alimentación y flujo de agua producto para sistemas EME Y EIME(MXN) [20]**

Flujo del agua producto	300 m <sup>3</sup> /día		1000 m <sup>3</sup> /día	
Tecnología	EME	EIME	EME	EIME
Salinidad de la alimentación = 10,000 mg/L TSD	\$7,558,544	\$12,957,504	\$25,375,112	\$33,743,500
Salinidad de la alimentación = 35,000 mg/L TSD	\$9,731,625	\$14,577,192	\$32,393,760	\$37,792,720
Salinidad de la alimentación = 60,000 mg/L TSD	\$11,850,717	\$15,589,497	\$39,479,895	\$40,492,200

Suposiciones:

Suministro de energía eléctrica disponible

Prefiltración básica incluida

Los costos indicados son sólo para la planta – no se incluye obra civil, tanques externos, trabajo de tuberías

#### Factores que influyen en los costos de capital de los sistemas EME y EIME

##### *Fuente de agua de alimentación*

Sólidos disueltos totales (TSD). La salinidad de la alimentación tiene un impacto creciente sobre la inversión de las plantas EME y EIME; sin embargo, no es tan significativo como para los sistemas OI. Para las plantas OI, este impacto es debido al incremento del requerimiento de bombeo con el incremento del TSD de la alimentación, por lo tanto, se requieren equipos más grandes. Para las plantas EME y EIME, un TSD más alto requiere materiales más resistentes a la corrosión. El costo de estos materiales inevitablemente tiene el impacto más significativo.

El TSD es usado como base en la Tabla 3 para suministrar una comparación de la inversión de los sistemas EME y EIME operando con alimentaciones a diferentes concentraciones. La Tabla 3 demuestra el impacto que, el incremento de TSD en la alimentación, tiene en la inversión

requerida; sin embargo, cuando se compara con la Tabla 1 (análisis de la inversión OI), el incremento debido al incremento del TSD de la alimentación no es significativo. Esto se debe primordialmente a la naturaleza de los métodos, como se describe arriba. La inversión de los procesos térmicos es generalmente insensible al incremento en el TSD de la alimentación.

- La regla aquí es: Mientras todo se mantenga igual, el decremento en el TSD del agua de alimentación provoca un decremento en la inversión; sin embargo, este impacto no es significativo para los procesos térmicos como lo es para el proceso OI.

Química del agua de alimentación y tasa de recuperación. En general, tasas de recuperación similares pueden lograrse para las plantas térmicas a diferentes salinidades del agua de alimentación. Así que, para un flujo dado de agua producto, los flujos de alimentación requeridos para lograr una recuperación específica de la planta son efectivamente independientes de su salinidad. El total de las recuperaciones de agua producto pueden ser incrementadas agregando efectos adicionales a la planta EME o en su caso etapas adicionales a las plantas EIME; sin embargo, estos se traduce en aumento de los costos de capital.

- La regla aquí es: Incrementar las recuperaciones de agua producto de las plantas provoca incrementar en los costos de capital.

Sólidos suspendidos totales (TSS) y turbidez en el agua de alimentación. Mientras que es importante remover sólidos suspendidos del agua de alimentación antes de los sistemas térmicos, no es tan crítico como para los sistemas OI. Altos niveles de sólidos suspendidos o turbidez podrían requerir múltiples pasos de pretratamiento, incrementando la inversión.

- La regla aquí: Mientras que todo permanezca igual, el decremento del TSS de la alimentación, provoca un decremento en la inversión.

### *Especificación del agua producto*

Como los procesos térmicos tienen como principio la destilación, el agua producto es muy pura independientemente de la salinidad de la alimentación, Esto debe proporcionar el alcance para mezclar algo de alimentación con el producto para reducir el tamaño total de la planta. Ésta

práctica sólo es efectiva cuando la salinidad de la alimentación es menor a 10,000 mg/L en el caso del sistema EME.

- La regla aquí es: La capacidad para aceptar una calidad menor de permeado reducirá la inversión.

### 3.3.2 Análisis de los costos de operación de los procesos EME y EIME

**Tabla 4. Costos de operación por salinidad de agua de alimentación y flujo de agua producto para sistemas EME y EIME(MXN/m<sup>3</sup>) [20]**

Flujo del agua producto	300 m <sup>3</sup> /día				1000 m <sup>3</sup> /día			
	Con calor residual		Sin calor residual		Con calor residual		Sin calor residual	
Tecnología	EME	EIME	EME	EIME	EME	EIME	EME	EIME
Salinidad de la alimentación = 10,000 mg/L TSD	\$11.5	\$11.9	\$18.5	\$35.1	\$6.7	\$11.5	\$17.5	\$24.3
Salinidad de la alimentación = 35,000 mg/L TSD	\$12.1	\$12.6	\$20.2	\$36.4	\$8.1	\$12.1	\$19.8	\$27.0
Salinidad de la alimentación = 60,000 mg/L TSD	\$12.8	\$13.2	\$22.9	\$37.8	\$8.8	\$12.8	\$21.2	\$29.7

Suposiciones:

Costo de energía eléctrica = 1.9 MXN/KWh

Sólo se toman en cuenta el costo por desalar el agua, no incluye la entrega de agua a la planta y la entrega del agua al usuario

Suposición de los costos de operación

Los costos de operación suponen una prefiltración básica

Los costos de operación fueron calculados y promediados para toda la esperanza de vida de las plantas EME y EIME

### Factores que influyen en los costos de operación de los procesos térmicos

#### *Energía eléctrica y calor residual*

La Tabla 4 demuestra la importancia de la disponibilidad de calor residual para los costos de operación del proceso EME. Aunque los procesos siempre usarán energía eléctrica (bombeo a baja presión, instrumentación, etc.) el principal requerimiento de energía es el que calienta el agua y facilita la destilación, de la misma manera ocurre con el proceso EIME. Si puede ser obtenido de una fuente residual de calor, los costos de operación se reducen drásticamente.

- La regla aquí es: la disponibilidad de calor residual reduce dramáticamente los costos de operación de los procesos térmicos.

#### *Uso de químicos*

Todos los sistemas deben usar productos químicos con el fin de pretratar el agua de enfriamiento. Los productos usados son principalmente antiincrustantes/dispersantes que se dosifican dentro de la corriente de agua de alimentación. Estos químicos tienen un impacto significativo en los costos de operación y su uso necesita ser optimizado, para una aplicación específica, con el fin de reducir los costos de operación.

#### *Filtros*

El reemplazo de los cartuchos filtrantes, influencia no sólo sus propios costos, sino también los costos de mantenimiento de los sistemas térmicos. Al final, la acumulación de sólidos suspendidos en la planta EME afectará el desempeño de la planta requiriendo un mantenimiento muy extenso. Usualmente el tipo óptimo de cartucho es aquel que proporciona la retención de partícula más pequeña mientras mantiene una buena capacidad de detener el ensuciamiento.

Aquí de nuevo, es esencial probar diferentes tipos de filtros ya que cada uno tiene ventajas en diferentes aplicaciones. El método de selección más apropiado es tomar medidas del TSS antes y después de los filtros y medir la rapidez del incremento de la caída de presión.

### *Mantenimiento*

Un mantenimiento correcto y a tiempo para los sistemas térmicos es esencial. Un buen régimen de mantenimiento ayuda a la gestión de los costos asociados con la producción insuficiente de agua. El mantenimiento se refiere a la recalibración de las bombas dosificadoras, la recalibración de instrumentos, corroborar la vibración o desgaste de los equipos rotativos y hacer los ajustes a los componentes para compensar cualquier variación en el agua de alimentación o incrustación en la superficie de los intercambiadores de calor. Esto optimiza el uso de químicos y asegura la consistencia de la producción de agua.

### *Costos de la alimentación*

Ciertas consideraciones deben ser dadas a los costos de entrega de la alimentación a las plantas. Los costos deben incluir:

- Establecimiento de orificios o entradas de agua de mar.
- Instalación, operación y control de las bombas de transferencia.
- Mano de obra tal como líneas de tubería, estaciones de transferencia.
- Mantenimiento de equipo [19].

## **3.4. Costos por la energía**

Pese a que la información sobre costos de la sección anterior incluye de manera implícita los costos de la energía eléctrica usada por las tecnologías de desalación, ésta no incluye los costos de combustible usados en los procesos de destilación y la apreciación de los costos que implica cada fuente de energía no es muy clara. Por tal motivo, en esta sección se presentan datos de costos para ambas fuente de energía obtenidos de la literatura para observar la tendencia de los mismos.

### 3.4.1. Combustibles

Es bien sabido que las tecnologías de destilación utilizan combustibles para la generación del calor necesario para la evaporación del agua, la Tabla 5 muestra el costo del combustible para las tecnologías EIME y EME en función del tipo de combustible para el mercado internacional. Hay que considerar que la tecnología de las plantas puede variar sustancialmente en función del combustible utilizado [21].

**Tabla 5. Costos del combustible para desalación de agua de mar (MXN/m<sup>3</sup>) en función de su naturaleza [20]**

<b>Combustible</b>	<b>EIME</b>	<b>EME</b>
<b>Gas natural</b>	\$17-25	\$12-17
<b>Carbón</b>	\$14-21	\$11-14
<b>Petróleo</b>	\$4-7	\$3-4

### 3.4.2. Energía eléctrica

Las tecnologías EME y EIME consumen adicionalmente energía eléctrica para la circulación de los flujos de alimentación, salmuera, destilado y retorno del condensado. Las plantas EIME necesitan una bomba adicional de recirculación de salmuera, que incrementan su consumo ostensiblemente con respecto a la tecnología EME. La Tabla 6 muestra el consumo específico y los costos económicos asociados a este consumo [21]:

**Tabla 6. Costos del consumo eléctrico de las plantas EIME y EME [20]**

<b>Tecnología</b>	<b>Consumo específico (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Costo (MXN/m<sup>3</sup>)</b>
<b>EIME</b>	3.5 - 4.0	\$2.3-2.6
<b>EME</b>	1.5 - 2.0	\$1.0-1.3

Finalmente, los costos de la energía eléctrica para los sistemas OI que sólo aplican al flujo de alimentación (el bombeo de alta presión para el primer paso del proceso OI y el segundo paso del proceso OI o media presión) son los siguientes, para el agua de mar de 2.3 a 4.8 MXN/m<sup>3</sup> y para el agua salobre de 0.8 a 2.2 MXN/m<sup>3</sup>.

## **CAPÍTULO 4**

### **IMPACTOS AMBIENTALES**

A pesar de que la desalación de agua marina ofrece una amplia gama de beneficios socioeconómicos a partir de un aparente ilimitado suministro de agua potable de alta calidad que no perjudica el agua de los ecosistemas terrestres, ciertas preocupaciones han surgido debido a impactos ambientales nocivos de carácter acumulativo [22].

Una de las principales preocupaciones es el potencial del impacto ambiental causado por la gran descarga de salmuera (también conocida como corriente rechazada o de rechazo) y a las sustancias presentes en ella, un inevitable subproducto que podría afectar fuertemente la biología marina. Las recomendaciones se perfilan a reducir la degradación relacionada a la hipersalinidad. Otro inconveniente, que será mayormente estudiado en el capítulo 5, es la producción de gases de efecto invernadero asociados con la energía requerida.

Es muy importante señalar enfáticamente, que si bien la información que constituye el cuerpo del presente capítulo y del siguiente tienen importantes aportes bibliográficos, éstos son generales, puesto que cada planta desaladora tendrá aportaciones distintas y cada zona será afectada de manera particular dependiendo de sus características medioambientales, por lo que se debe realizar una evaluación de impacto ambiental (EIA) completa que corresponde a un procedimiento técnico-administrativo que se sustenta sobre el concepto de que el ambiente posee determinadas cualidades: físicas, biológicas, económicas o culturales, positivas o negativas, que le otorgan o le restan valor por lo que al evaluar el proyecto, la EIA procura predecir y juzgar las ganancias o pérdidas de valor, así como la proposición de medidas que mejoren el balance final o que rechacen el proyecto si sus costos ambientales son muy elevados [23].

Pese a lo anterior, en un trabajo [24], se desarrolló una evaluación de impacto ambiental para una planta desaladora en el Edo. de Guerrero, conformada por 5 puntos básicos:

- Fuerzas Conductoras, justificaciones de realización de un proyecto. Son posiblemente el objetivo fundamental que persigue de manera general un proyecto.
- Presión, actividades que pueden ser elementos que incidan sobre el ambiente de manera relevante.

- Estado, corresponde a cada uno de los elementos sensibles al cambio.
- Impacto, calificación y trascendencia de los impactos ambientales.
- Respuesta, se refiere a la acción que tendrá el desarrollador y la administración, para responder a la demanda de desarrollo sustentable, se constituye de estrategias de prevención, mitigación y compensación de los impactos que la obra puede ejercer sobre el ambiente.

Por otra parte, los indicadores de presión correspondientes fueron: preparación del sitio, construcción y, operación y mantenimiento, mientras que los estados considerados susceptibles del impacto ambiental son agua, suelo y aire como medio físico, flora y fauna terrestre y marina como medio biótico, además se encuentran aspectos no ambientales como: la economía, mano de obra, empleo y, estilo y calidad de vida como medio socioeconómico.

De esta manera, con las bases anteriores, en [25] se elaboró una Matriz de Impacto Ambiental (MIA), Figuras 7, 8 y 9, cuya información será usada en este trabajo, aunada a la información de otros autores (citados posteriormente) y en conjunto con el ejemplo de España para ilustrar los principales impactos ambientales de las tecnologías de desalación.

ETAPA	ACTIVIDAD	ATRIBUTOS DEL MEDIO FISICO									
		CALIDAD DEL AIRE	RUIDO	CALIDAD DEL SUELO	PLANICIES COSTERAS	MANTOS FREATICOS	SALINIDAD	CONCENT. OXIGENO	DENSIDAD	TURBIDEZ	ALTERACION DE HABITATS
Preparación del sitio	Levantamiento topográfico										
	Despeje y desbroce										
	Nivelación y compactación										
Construcción	Zanja en tierra con entibación.										
	Zanja en playa										
	Tendido de la tubería.										
	Enterramiento de la tubería.										
	Obra civil										
	Instalación de tramo difusor										
Operación	Absorción de agua de mar										
	Operación de bombas										
	Generación de lodos										
	Abastecimiento de agua potable										
	Descarga de salmuera										

**Figura 7. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio físico**

ACTIVIDAD	ATRIBUTOS DEL MEDIO BIOECOLOGICO							
	FLORA TERRESTRE	FAUNA TERRESTRE	FLORA MARINA	FAUNA MARINA	PLANCTON	BENTOS	AVES ACUATICAS	ECOSISTEMA
Levantamiento topográfico								
Despeje y desbroce								
Nivelación y compactación								
Zanja en tierra con entibación.								
Zanja en playa								
Tendido de la tubería.								
Enterramiento de la tubería.								
Obra civil								
Instalación de tramo difusor								
Absorción de agua de mar								
Operación de bombas								
Generación de lodos								
Abastecimiento de agua potable								
Descarga de salmuera								

**Figura 8. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio bioecológico**

ACTIVIDAD	ATRIBUTOS DEL MEDIO SOCIOECONOMICO												
	ACTIVIDAD PESQUERA	COMERCIO	DESARROLLO TURISTICO	DESARROLLO INDUSTRIAL	EMPLEO	CONFLICTO USO RESIDENTES	ANTAGONISMO ACT. ECONOMICAS	COMPATIBILIDAD USO ACTUAL	APROV. APTITUD O VOCACION	RIESGOS Y SALUD PUBLICA	PAISAJE	SUSTENTABILIDAD	BIENESTAR HUMANO
Levantamiento topográfico													
Despeje y desbroce													
Nivelación y compactación													
Zanja en tierra con entibación.													
Zanja en playa													
Tendido de la tubería.													
Enterramiento de la tubería.													
Obra civil													
Instalación de tramo difusor													
Absorción de agua de mar													
Operación de bombas													
Generación de lodos													
Abastecimiento de agua potable		SC	SC		SC			SC	SC	SC	SC	SC	SC
Descarga de salmuera													

**Figura 9. Matriz de interacción de impactos identificados por el proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de Ensenada B. C., medio socioeconómico**

Dentro de la MIA existe una columna donde se desglosan los indicadores de presión en actividades más específicas dentro del proyecto, de los recuadros es posible encontrar algunos de color rojo que corresponden a aquellos elementos donde se está produciendo un impacto negativo por el sistema de desalación mientras que los de color azul son aquellos elementos donde existe un beneficio gracias al sistema.

#### **4.1. Levantamiento topográfico**

El levantamiento topográfico no afecta ningún atributo del medio físico, bioecológico y socioeconómico, puesto que sólo es una actividad de recopilación de información y datos para el desarrollo del proyecto.

#### **4.2. Despeje y desbroce del área**

El despeje y desbroce (extracción y retiro de árboles, plantas, maleza, maderas caídas, escombros, basura o cualquier otro material indeseable) del área comienza a afectar el suelo puesto que es necesario mover elementos que naturalmente ya se encontraban en el lugar, y se generan residuos orgánicos producto de la vegetación retirada, además algunos materiales de las unidades que participen en esta etapa, pueden caer, derramarse o quedar en los rines y quedarán esparcidos por todo el lugar, pudiendo llegar a provocar la contaminación de otras áreas fuera de la establecida para el proyecto.

#### **4.3. Nivelación y compactación**

La nivelación y compactación (aumento de la resistencia superficial de un suelo para la construcción de cualquier obra) por lo regular tienen como resultado, la ruptura de la matriz edáfica en partículas de diversos tamaños, lo cual los deja expuestos a ser arrastrados por elementos de intemperismo o bien, los deja susceptibles a sufrir movimientos por gravedad, al carecer de las estructuras de fijación.

#### **4.4. Zanja en tierra con entibación, zanja en playa y enterramiento de la tubería**

La creación de zanjas en suelo y playa con entibación también afectan la calidad del suelo pues se modifican sus características, el tendido y enterramiento de la tubería no provoca un cambio pues el efecto ya se originó con la zanja y entibación.

#### **4.5. Obra civil**

Las actividades de la obra civil comienzan a afectar el aire con el levantamiento de polvo y escombros debido a la coincidencia con temporadas de fuertes vientos y lluvias y el arrastre hacia ambientes circundantes, la modificación del terreno es otra de las actividades que son parte del impacto ambiental. La construcción, también genera ruido con el uso de máquinas y equipos y la planicie costera se ve afectada con los mismos elementos. Es posible que las áreas se vean afectadas por derrame de sustancias usadas en el mantenimiento de los equipos y por el paso de los equipos por áreas no indicadas como rutas para el desarrollo del proyecto. La invasión de terrenos vecinos en intervalos de descanso y alimentación pueden ser motivo de contaminación por basura y degradación tardía de los elementos, también las necesidades fisiológicas de los trabajadores en lugares inadecuados puede provocar contaminación del medio ambiente. La realización de actividades en distintos turnos provocará la emisión de ruidos con el excedente de los límites establecidos, mientras que la operación inadecuada de máquinas y equipos puede provocar un funcionamiento ineficiente y con impactos ambientales adicionales [24].

#### **4.6. Instalación de tramo difusor**

La instalación del tramo difusor de la corriente de rechazo provoca la alteración de la planicie costera al modificar su vista y estructura y también altera el hábitat de algunas especies con su introducción.

#### **4.7. Absorción de agua de mar**

Las plantas de desalación de agua marina pueden recibir agua de alimentación de diferentes fuentes, pero las tomas de alimentación de mar abierto son la opción más común. El uso de éstas puede resultar en pérdidas de organismos acuáticos cuando éstos colisionan con las rejillas de alimentación (impacto) o son arrastrados hacia la planta junto con el agua de alimentación (arrastre). La construcción de la estructura de la toma y la tubería causan una perturbación inicial en el lecho marino, que resulta en la resuspensión de sedimentos, nutrientes o contaminantes dentro de la columna de agua. Después de su instalación, las estructuras pueden afectar el

intercambio de agua y el transporte de sedimentos, actuando como arrecifes artificiales para los organismos, o interfiriendo con las rutas de envío u otros usos marítimos [22].

#### **4.8. Operación de bombas**

La operación de bombas y equipos disminuye la calidad del aire por el ruido y calor que generan durante su funcionamiento y ahuyentan a las aves que podrían vivir en ese lugar. El nivel de ruido generado por estos equipos es elevado, sobre todo si se encuentran concentrados en algún lugar de la planta, alcanzando valores encima de 90 dB.

El segundo impacto más grande también se presenta en este punto, donde la generación de la electricidad para el funcionamiento de los equipos y sistemas de bombeo, generan la producción de gases de efecto invernadero: sin embargo, este tema se tratará más adelante.

#### **4.9. Descarga de salmuera**

##### **4.9.1. Salinidad y temperatura**

Todos los procesos de desalación producen una cantidad considerable de concentrado, la cual posee una temperatura mayor a la del mar circundante, contiene residuos de pretratamiento y químicos de limpieza y las reacciones de productos o subproductos así como metales pesados originados de la corrosión. Como se vio en el capítulo 2, el pretratamiento químico y la limpieza es una necesidad en la mayoría de las plantas desaladoras y típicamente comprende acciones contra el bioensuciamiento, incrustaciones, antiespumantes y corrosión en plantas térmicas, y bioensuciamiento, sólidos suspendidos y depósitos de incrustantes en las plantas de membrana.

La salinidad y la temperatura son factores controlantes para la distribución de las especies marinas, quienes normalmente residen en aquellas áreas que les proporcionan condiciones ambientales favorables. La mayoría de las especies pueden adaptarse a desviaciones menores de las condiciones óptimas de salinidad y temperatura, y pueden incluso tolerar situaciones extremas temporalmente, pero no exposición continua a condiciones no favorables. La constante descarga de las corrientes de rechazo con elevados niveles de salinidad y temperatura pueden, entonces,

ser fatales para la vida marina, y causar un cambio duradero en la composición en el sitio de descarga, dada su acumulación. Los organismos marinos pueden ser atraídos o repelidos por estas nuevas condiciones ambientales y aquellos que se adapten mejor a la situación eventualmente prevalecerán en el sitio de descarga. Debido a su densidad, las corrientes de rechazo de los procesos térmicos y de ósmosis inversa afectan a los diferentes reinos marinos. La salmuera de las plantas de OI, que posee una densidad mayor que la del agua marina, se dispersará sobre el piso marino en aguas superficiales costeras a menos que sea disipada por un sistema difusor. Por su parte, las comunidades bentónicas, tales como los pastos marinos, pueden entonces verse afectadas como una consecuencia de la alta salinidad y los residuos químicos. En contraste, las corrientes rechazadas de las plantas de destilación, especialmente cuando se combinan con el agua de enfriamiento de plantas de energía, son típicamente capaces de flotar, de manera que afectarían a los organismos de mar abierto.

Los efectos ambientales sobre el medio ambiente marino pueden ocurrir especialmente cuando descargas elevadas de las corrientes de salida coinciden con ecosistemas sensibles. Los impactos ambientales de una planta de desalación sobre el medio ambiente marino dependen de las propiedades fisicoquímicas de las corrientes de rechazo así como de las características hidrogeográficas y biológicas del ambiente receptor. Los sitios cerrados y poco profundos con abundante vida marina son, generalmente, considerados a ser más sensibles a las descargas de las plantas de desalación que los lugares ubicados en el mar abierto, puesto que éstos son más capaces de diluir y de dispersar las corrientes de salida.

El proceso de desalación y el pretratamiento aplicado tienen una influencia significativa sobre las propiedades fisicoquímicas de las descargas. En ambos casos, la OI y las plantas térmicas, la salinidad de la salmuera de descarga (o *concentrado*) es mayor que la del agua de alimentación, pero la temperatura de la corriente de rechazo es solo más elevada en las descargas de las plantas térmicas. Por otra parte, ambos tipos de descargas contienen invariablemente residuos químicos de sustancias antiincrustantes, en tanto que los biocidas y los aditivos antiespumantes son usual y únicamente encontrados en las corrientes de rechazo de las plantas térmicas. Los metales provenientes de la corrosión están usualmente presentes en ambos tipos de corrientes de rechazo en variables, pero relativamente bajas, concentraciones.

En la corriente de rechazo de la OI, podría haber presencia de coagulantes si el agua de retrolavado procedente de la coagulación y de los dispositivos de filtración se combina con el agua residual del proceso. En adición, las corrientes rechazadas, especialmente de las plantas OI, podrían contener soluciones de limpieza ya utilizadas si éstas son mezcladas con la salmuera y descargadas al mar. Los impactos ambientales de la sola corriente de rechazo se discuten a continuación, pero debe mantenerse en mente que todo el efluente es una mezcla de los contaminantes citados, y que el efecto provocado también podría ser una mezcla de los efectos de cada contaminante sobre la vida marina [22].

En el caso de las plantas que funcionan por destilación el vertido de salmuera representa de 8 a 10 veces el volumen de agua desalada, mientras que en plantas de membranas de ósmosis inversa, el volumen de salmuera es menor que en las anteriores (2.5 a 3 veces el volumen de agua desalada) pero el vertido tiene un contenido en sales mucho mayor.

Habitualmente, el vertido de la salmuera en toda planta desaladora es devuelta al mar y se sabe que la descarga extensiva, constituye una capa hipersalina que se hunde hacia el fondo del mar debido a su gran densidad, pudiendo causar un problema medioambiental en los organismos marinos ya que su distribución está estrechamente relacionada con la temperatura y la salinidad, como lo demuestra el hecho de que en zonas estuáricas (zonas costera, normalmente abundantes en plantas y formas de vida acuática), donde hay variaciones significativas de salinidad, muchas especies no pueden sobrevivir, o incrementos o decrementos de pocos grados de la temperatura del agua pueden implicar la sustitución de unas especies y/o comunidades por otras. Evidentemente, la magnitud del impacto ambiental depende de las características del proceso de desalación, determinando la composición química de la salmuera producida, pero también de la hidrodinámica natural y de las condiciones batimétricas (condiciones de las profundidades marinas) así como los factores biológicos del ambiente marino local [26].

Incluso hay afecciones sobre la flora marina existente en las zonas costeras. Por ejemplo, en las costas del mar mediterráneo se encuentran cinco especies de praderas de angiospermas marinas, entre las cuales la endémica *Posidonia oceánica* es la más abundante, presentando comunidades muy estructuradas y, con una gran biomasa y producción. *P. oceánica* ha experimentado una regresión en las últimas décadas por lo que actualmente es una especie protegida por la ley de las

comunidades autónomas de Baleares, Cataluña y Valencia, y está catalogada como hábitat prioritario por las directivas de la Unión Europea.

No obstante las angiospermas marinas poseen diversas adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten sobrevivir y crecer en un medio, como el marino, de elevada salinidad; sin embargo, se ha observado que existen diversas publicaciones sobre los efectos de la salinidad en la fisiología y la producción de las angiospermas marinas, bajo condiciones hiposalinas.

Se desprende que existen una serie de efectos negativos asociados con un incremento de salinidad en el sistema sobre el metabolismo del nitrógeno y del carbono, así como una disminución de la fotosíntesis y de la producción en general de las angiospermas marinas.

A estos potenciales efectos negativos de la salinidad hay que añadir el hecho de que los vertidos de salmueras suelen ir asociados a temperaturas más elevadas, con lo que existe también un efecto negativo combinado asociado a la disminución de la concentración de oxígeno.

Condiciones naturales de elevada temperatura y salinidad y bajas concentraciones de oxígeno pueden encontrarse en verano en las masas de agua delimitadas exteriormente por un arrecife barrera de *Posidonia oceánica* e interiormente por la línea de la costa. Dichas zonas (postarrecife o laguna), siempre poco profundas y confinadas, están sujetas a oscilaciones importantes de salinidad, a causa de la enorme evaporación en la época estival<sup>8</sup> (condiciones hipersalinas) como el aporte de agua dulce en épocas lluviosas (condiciones hiposalinas). En estas condiciones *Posidonia oceánica* desaparece y es sustituida por *Cymodocea nodosa* y *Zostera noltii* siguiendo un gradiente de baja a alta tolerancia a las perturbaciones salinas y de temperatura [27].

En un estudio [28] del impacto biológico del vertido de una planta desaladora en Key West (Florida), se describe la desaparición de las comunidades originales y la sustitución de éstas por pocos organismos característicos de situaciones de estrés (poliquetos serpúlidos, sarbélidos y el crustáceo balano) en las zonas más afectadas por el vertido. Los equinodermos presentaban la máxima sensibilidad al vertido y desaparecían totalmente de la zona afectada. Por lo que respecta a las poblaciones de peces, el comportamiento de éstos no parecía afectado por el vertido de salmuera si bien huían claramente de las emisiones turbias asociadas a operaciones de

---

<sup>8</sup> Época más calurosa del año

mantenimiento de la planta; sin embargo, la falta de respuesta de los peces a la salmuera no implica que no estuvieran afectados. Se describen pequeñas heridas en la piel de algunas especies de peces así como lesiones en hígados de góbidos<sup>9</sup> analizados (posiblemente por altas concentraciones de cobre). No obstante, los resultados del impacto del vertido sobre la fauna móvil no son concluyentes, pues no se pueden separar del posible impacto del propio puerto.

#### 4.9.2. Biocidas

En la mayoría de las plantas desaladoras, el cloro es añadido al agua de alimentación para reducir el bioensuciamiento, el cual propicia la formación de hipoclorito y principalmente de hipobromito en dicha corriente. Niveles de FRC [*Free Residual Chlorine*; la suma de los residuos libre y combinados de cloro disponibles en un sistema determinado] de 200-500 µg/L, que es aproximadamente 10-25% de la concentración de dosificación, han sido reportados para corrientes de rechazo de plantas térmicas. En plantas de OI, el agua de alimentación es también clorada, pero declorada nuevamente con bisulfito de sodio antes de que el agua entre a las unidades de OI, para prevenir daños en la membrana. En la descarga siguiente, un descenso posterior en los niveles de FRC de hasta 90% es esperado, lo cual se traduce en concentraciones estimadas de 20-50 µg/L de cloro en el sitio de descarga. Esto es consistente con los niveles observados de 30-100 µg/L en las zonas de mezclados de plantas desaladoras de gran escala.

A pesar de que los niveles ambientales de FRC decrecen rápidamente por la degradación y dilución siguiente a la descarga, el potencial de los efectos adversos sigue siendo elevado. El cloro es un biocida muy efectivo, y su toxicidad ha sido confirmada por diversos estudios toxicológicos. Basada en datos toxicológicos de un amplio espectro de especies marinas, la *Environmental Protection Agency* de los Estados Unidos, EPA, recomienda un criterio a largo plazo para la calidad del agua de mar de 7.5 µg/L, y un criterio de corto plazo de 13 µg/L. El análisis de riesgo ambiental de los Estados Unidos para el hipoclorito ha determinado una *concentración predicha sin efecto* [PNEC, *Predicted No Effect Concentration*] para las especies de agua marina de 0.04 µg/L de cloro libre disponible. Niveles de descarga de 200-500 µg/L y concentraciones ambientales de hasta 100 µg/L representan, entonces, un peligro serio para la vida acuática marina. Además, el análisis de riesgos de los Estados Unidos advierte que los

---

<sup>9</sup> Familia de peces osteíctios, del orden perciformes; tienen las aletas ventrales fusionadas para constituir una especie de ventosa que les sirve de órgano adhesivo y la piel viscosa y desnuda.

efectos sinérgicos del estrés térmico y la exposición al cloro residual deberían ser tomados en consideración, lo cual fue demostrado en varios estudios, e. g., para la descarga de los efluentes de enfriamiento de las plantas de energía.

Los impactos potenciales también resultan de la formación de subproductos orgánicos halogenados. Debido a muchas posibles reacciones del hipoclorito e hipobromito con los constituyentes orgánicos del agua marina, la diversidad de subproductos es alta, incluyendo trihalometanos [THMs] como el bromoformo o ácidos haloacéticos. Niveles elevados de THM cerca de plantas de destilación de hasta 83  $\mu\text{L}$  han sido reportados. Dado que sólo un pequeño porcentaje del cloro total agregado es recuperado como un subproducto halogenado, y dado que la diversidad de subproductos es elevada, se espera que la concentración ambiental de cada sustancia sea relativamente baja. Sin embargo, datos ecotoxicológicos en conexión con la evaluación de la cloración del agua marina, sugieren que las ecotoxicidades de los THMs bromados no son notablemente diferentes respecto al cloroformo. En el análisis de riesgo de los Estados Unidos, se concluyó entonces que la toxicidad de los THMs totales puede ser ampliamente analizada al usar el PNEC para cloroformo, que es de 146  $\mu\text{g/L}$  para las especies de agua dulce. El cloro residual en la descarga tiene entonces una ecotoxicidad significativamente mayor para la vida acuática que los subproductos; sin embargo, las etapas de la vida sensibles y las especies pueden responder a concentraciones crónicas, especialmente porque se ha encontrado que los THMs poseen propiedades carcinogénicas para los animales.

#### **4.9.3. Metales pesados**

Las aleaciones de cobre-níquel son comúnmente usadas como materiales para los intercambiadores de calor de las plantas de destilación, de manera que la contaminación de la salmuera con cobre debida a la corrosión puede ser una preocupación acerca de la corriente de rechazo de las plantas térmicas. La salmuera derivada de los procesos de OI podría contener trazas de hierro, níquel, cromo y molibdeno, pero la contaminación con estos metales se encuentra por lo general debajo de un nivel crítico, dado que equipo no metálico y acero inoxidable predominan en las plantas de desalación por OI.

Usualmente, se espera que las concentraciones de cobre en la corriente de rechazo se encuentren en el rango de 15-100  $\mu\text{g/L}$ . La presencia de cobre no significa, necesariamente, que

éste afecte adversamente al ambiente. El intervalo natural de concentración para un fondo oceánico es de 0.1 µg/L hasta 100 µg/L en estuarios. En el Golfo Árabe, por ejemplo, los niveles de cobre fueron reportados [29] en el intervalo de menos de 1 µg/L en Qatar hasta 25 µg/L en Kuwait. Es generalmente difícil distinguir entre los niveles naturales de cobre y los efectos antropogénicos, *e. g.*, causados por los desagües industriales o la contaminación por petróleo. Los niveles de descarga de las plantas térmicas se encuentran; sin embargo, dentro de los niveles que podrían afectar las concentraciones naturales de cobre. La EPA recomienda [30] una concentración máxima de cobre de 4.8 µg/L en el agua de mar para exposición breve y 3.1 µg/L para exposición a largo plazo. Valores del mismo orden de magnitud fueron determinados para los ambientes de agua marina europeos: Hall y Anderson [31] derivaron un PNEC de 5.6 µg/L y el objetivo de calidad del mediterráneo es de 8 µg/L. El cobre, como la mayoría de los metales, es transportado y acumulado en sedimentos, lo cual es una preocupación importante en puntos de descarga, puesto que ello puede conducir a incrementar la concentración de sedimentos en estos sitios. Los metales en sedimentos pueden ser asimilados por organismos benthicos (organismos que se encuentran en el nivel más bajo de un cuerpo de agua), que a menudo forman la base de la cadena alimenticia marina.

#### **4.9.4. Antiincrustantes**

Los antiincrustantes son añadidos al agua de alimentación tanto en plantas térmicas como de OI para prevenir la formación de incrustaciones. El término se refiere a sustancias poliméricas con estructuras químicas distintas, en particular ácidos policarbónicos [*e. g.*, ácido polimaléico] y fosfonatos. Los polifosfatos y el ácido sulfúrico son también usados para prevenir la formación de incrustaciones, aunque en una escala limitada. La toxicidad de todos los antiincrustantes para la vida acuática es muy baja. Problemas de eutroficación (enriquecimiento de las aguas con nutrientes a un ritmo tal que no puede ser compensado por su eliminación definitiva por mineralización, de manera que el exceso de materia orgánica producida hace disminuir enormemente el oxígeno en las aguas profundas) han sido observados cerca de las salidas de las plantas desaladoras en las que se usaron polifosfatos, dado que éstos son fácilmente hidrolizados a ortofosfato, el cual es un nutriente importante para los productores primarios. En contraste, los ácidos policarbónicos y los fosfonatos son sustancias estables con velocidades de degradación bajas, lo cual resulta en tiempos de residencia largos en aguas costeras. Debido a que estas sustancias reducen la formación de incrustación al dispersar y acomplejar iones de calcio y

magnesio en las plantas de desalación, ellos podrían también influir en procesos naturales de éstos y otros metales divalentes en el ambiente marino.

#### **4.9.5. Coagulantes [Plantas de OI]**

Los coagulantes (como el cloruro de hierro III) y sus auxiliares (como moléculas orgánicas de alto peso molecular, por ejemplo, poliacrilamida) son adicionados a la corriente de alimentación para la coagulación y al medio filtrante de material suspendido. Los medios filtrantes son retrolavados a contracorriente intermitentemente, y el agua de retrolavado que contiene el material suspendido es típicamente descargada al océano sin tratamiento. Estos químicos por sí mismos poseen un potencial tóxico muy bajo; sin embargo, su descarga puede causar una coloración intensa de la corriente de rechazo si sales férricas son usadas (“salmueras rojas”), lo cual puede incrementar la turbidez y reducir la penetración de luz, o podría enterrar organismos bénticos sésiles (organismo acuático que crece adherido, agarrado o arraigado en su sustrato, del que no se separa y sobre el que no se desplaza) en el sitio de descarga.

#### **4.9.6. Agentes antiespumantes [Plantas térmicas]**

Para reducir la espuma en plantas térmicas, agentes antiespumantes como el polietilenglicol pueden ser añadidos a la corriente de alimentación. Los poliglicoles no son tóxicos, pero podrían persistir en el ambiente debido a su pobre degradabilidad, lo que podría alterar el equilibrio de ecosistemas marinos delicados.

#### **4.9.7. Químicos de limpieza**

El procedimiento de limpieza depende del tipo de incrustación. En las plantas de OI, se utilizan soluciones alcalinas (pH 11-12) para remover depósitos de limo y biopelículas de las membranas, mientras que las soluciones ácidas (pH 2-3) son aplicadas para disolver óxidos metálicos o incrustaciones. Estas soluciones a menudo contienen sustancias adicionales para mejorar el proceso de limpieza, como detergentes (e.g., dodecilsulfato, dodecibencensulfonato) u oxidantes (e.g., perborato de sodio, hipoclorito de sodio). Después de la limpieza o antes del almacenamiento, las membranas son típicamente desinfectadas. Para este propósito, tanto biocidas oxidantes (como cloro o peróxido de hidrógeno) o biocidas no oxidantes (como formaldehído, glutaraldehído o isotiazol) pueden ser aplicados. Las plantas de destilación son

típicamente limpiadas con agua marina ácida caliente para remover incrustaciones de las superficies de los intercambiadores de calor, las cuales pueden contener inhibidores de la corrosión (e.g., derivados de benzotiazol). Estas soluciones de limpieza, especialmente sus aditivos, pueden ser dañinas para la vida acuática si son descargadas en las aguas marinas superficiales sin tratamiento [22].

Para fines prácticos, la Tabla 7 muestra un resumen de distintos tipos de sustancias vertidas y su afectación en el medio ambiente.

**Tabla 7. Resumen de sustancias vertidas**

<b>Compuestos</b>	<b>Origen/Función</b>	<b>Impacto</b>
Metales pesados: Cu, Fe, Ni Cr, Zn	Corrosión	Acumulación en el sistema, estrés a nivel molecular y celular
Fosfatos	Antiincrustantes	Macronutriente, eutrofización
BELGARD'2000 (Ácido Málico)	Antiincrustantes	Desconocido
Cl <sup>-</sup>	Antiensuciante	Formación de compuestos halogenados, carcinógenos y mutágenos
Ácidos grasos	Tensoactivos	Membranas celulares
Sulfuro de sodio	Anticorrosivo, captura de O <sub>2</sub>	Desconocido
Ácido sulfúrico	Antiincrustante	En grandes cantidades baja significativamente el pH del sistema
Residuos sólidos	Limpieza de membranas	Turbidez
Salmuera	Concentrado de agua de mar	Variable
Temperatura	Tratamiento	Variable

Por otro lado, la creación de la planta generará empleos principalmente durante todas las fases de la preparación del sitio y construcción y durante la operación y mantenimiento con el abastecimiento del agua, además, el sistema de conducción del agua beneficiará el comercio, desarrollo turístico, industrial, se verá beneficiado el sector poblacional en salud, sustentabilidad y bienestar humano.

Es importante reiterar, que puede existir algunos otros efectos no tratados en este capítulo que sean específicos del lugar donde se instalará la planta; sin embargo, los efectos mencionados a través de este capítulo son los principales y cuentan con medidas para prevenirlos y evitar que se presenten y/o mitigarlos para que, a pesar de ser poco importantes, se manifiesten en menor grado, todo con el fin de asegurar que el beneficio de la planta desaladora se mantenga, e incluso se incremente.

## **CAPÍTULO 5**

### **AGUA, ENERGÍA E IMPACTOS AMBIENTALES ASOCIADOS**

#### **5.1. Agua y energía**

La Revolución Industrial del siglo XVIII, iniciada en Inglaterra, implementó la máquina de vapor y la energía obtenida del carbón. En la segunda mitad del siglo XX, apareció el establecimiento de la relación producto bruto-consumo de energía, confirmando la idea del papel de la energía en el desarrollo económico, sucediendo al mismo tiempo, la alarma del agotamiento de los recursos naturales.

A partir del alza de precios en 1973, la perspectiva del agotamiento de recursos se fortaleció; el mal gasto de energía y otros recursos se favoreció por la abundancia del petróleo a precio barato. Desde entonces, surgieron ideas sobre el agotamiento del petróleo, gas y el origen de efectos ambientales adversos, como el efecto invernadero.

Los hombres de ciencia se percataron que no existía una solución única para el problema de las necesidades de recursos, aceptando que el aumento desmedido de las fuentes de estos recursos no constituye el bienestar total, sino lo anterior y la protección del ambiente.

Se ha decidido que la problemática no puede limitarse a aspectos técnico-económicos, sino también ambientales por lo que la discusión del problema energético y sus posibles soluciones es un tema de gran interés [33].

El agua y la energía son dos elementos que gobiernan nuestra manera de vivir. Al retroceder en el tiempo, podemos ver que el agua es un recurso inseparable de las civilizaciones, siendo un hecho que las más grandes civilizaciones florecieron y se desarrollaron cerca de grandes cuerpos de agua porque el agua es un recurso importante para la vida. Por otro lado, la energía es igual de importante que el agua, para poder desarrollar un buen nivel de vida, pues provee la fuerza para el funcionamiento de un sinnúmero de actividades humanas. El agua por sí misma es una fuente generadora de energía. Los primeros intentos confirmados de controlar la energía del agua,

sucedieron hace más de 2 mil años. Esa energía fue utilizada principalmente para la molienda de granos [32, 34].

## **5.2. Plantas termoeléctricas**

Se denominan plantas termoeléctricas clásicas o convencionales a aquellas plantas que producen energía eléctrica a partir de la combustión de carbón, aceite-combustible o gas en una caldera diseñada al efecto. El apelativo de clásicas o convencionales sirve para diferenciarlas de plantas termoeléctricas nucleares o solares, las cuales generan energía eléctrica mediante un ciclo termodinámico, pero mediante fuentes energéticas distintas de los combustibles fósiles

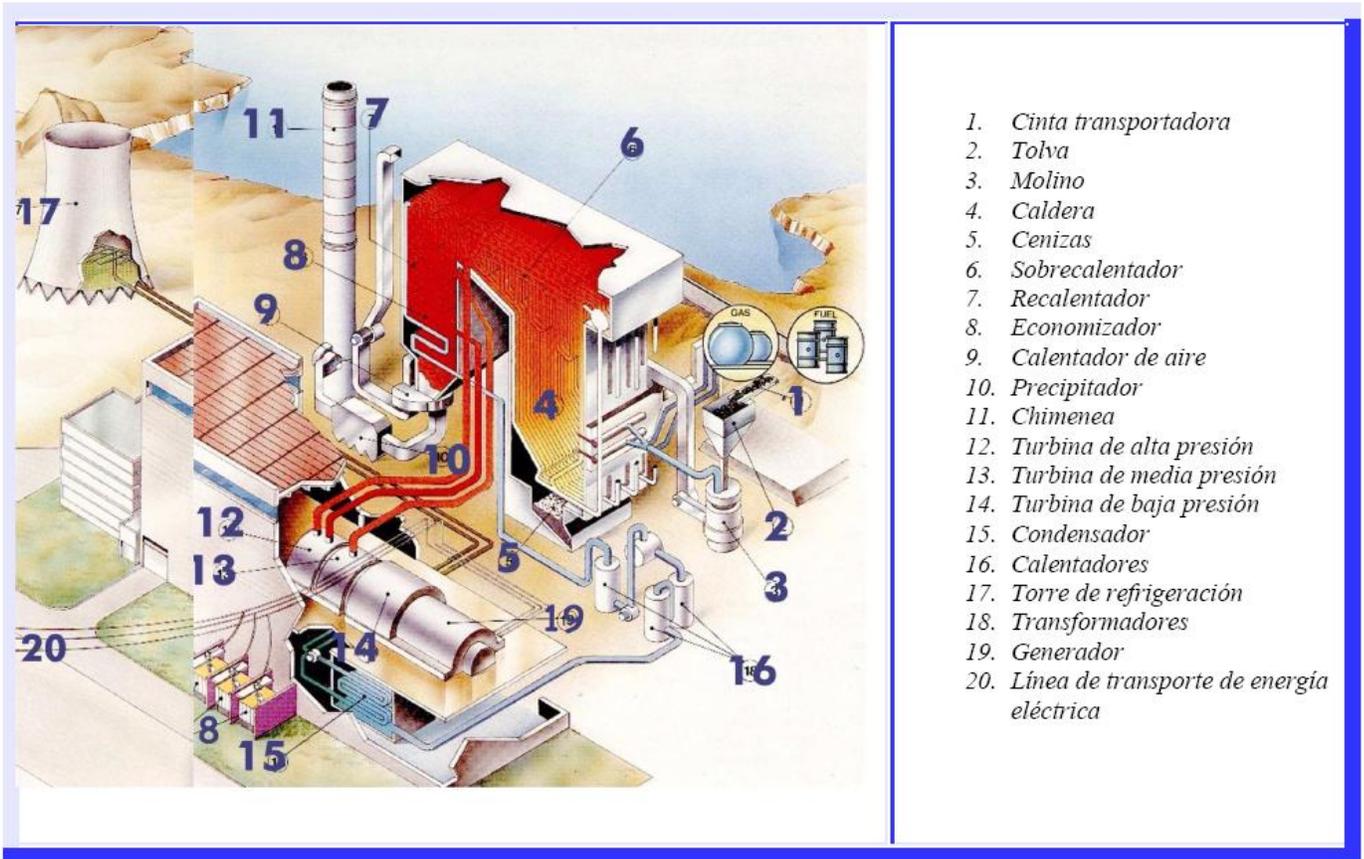
Independientemente de cuál sea el combustible fósil que utilicen (aceite-combustible, carbón o gas), el esquema de funcionamiento de todas las plantas termoeléctricas es el mismo. Las únicas diferencias consisten en el distinto tratamiento previo que sufre el combustible antes de ser inyectado en la caldera y en el diseño de los quemadores de la misma, que varían según el tipo de combustible empleado.

Una planta termoeléctrica clásica posee, dentro del propio recinto de la planta, sistemas de almacenamiento del combustible que utiliza (parque de carbón, depósitos de aceite-combustible) para asegurar que se dispone permanentemente de una adecuada cantidad de éste. Si se trata de una planta termoeléctrica de carbón (hulla, antracita, lignito,...) es previamente triturado en molinos pulverizadores hasta quedar convertido en un polvo muy fino para facilitar su combustión. De los molinos es enviado a la caldera de la planta mediante chorro de aire precalentado.

Si es una planta termoeléctrica de aceite-combustible, éste es precalentado para que fluidifique, siendo inyectado posteriormente en quemadores adecuados a este tipo de combustible.

Si es una termoeléctrica de gas, los quemadores están concebidos especialmente para quemar dicho combustible.

En la Figura 10 se representa el funcionamiento de una planta termoeléctrica con base en carbón pero que sigue un procedimiento similar para aceite-combustible o gas.



1. Cinta transportadora
2. Tolva
3. Molino
4. Caldera
5. Cenizas
6. Sobrecalentador
7. Recalentador
8. Economizador
9. Calentador de aire
10. Precipitador
11. Chimenea
12. Turbina de alta presión
13. Turbina de media presión
14. Turbina de baja presión
15. Condensador
16. Calentadores
17. Torre de refrigeración
18. Transformadores
19. Generador
20. Línea de transporte de energía eléctrica

**Figura 10. Esquema de funcionamiento de una planta termoeléctrica clásica**

El combustible es almacenado en los parques adyacentes de la planta, desde donde, mediante cintas transportadoras (1), es conducido al molino (3) para ser triturado. Una vez pulverizado, se inyecta, mezclado con aire caliente a presión, en la caldera (4) para su combustión.

Dentro de la caldera se produce el vapor que acciona los álabes de los cuerpos de las turbinas de alta presión (12), media presión (13) y baja presión (14), haciendo girar el rotor de la turbina que se mueve solidariamente con el rotor del generador (19), donde se produce energía eléctrica, la cual se transporta mediante líneas de transporte de alta tensión (20) a los centros de consumo.

Después de accionar las turbinas, el vapor pasa a la fase líquida en el condensador (15). El agua obtenida por la condensación del vapor se somete a diversas etapas de calentamiento (16) y se inyecta de nuevo en la caldera en las condiciones de presión y temperatura más adecuadas para obtener el máximo rendimiento del ciclo.

El sistema de agua de recirculación que refrigera el condensador puede operarse en circuito cerrado, trasladando el calor extraído del condensador a la atmósfera mediante torres de enfriamiento (17), o descargando dicho calor directamente al mar o al río.

Para minimizar los efectos de la combustión, la planta posee una chimenea (11) que dispersa los contaminantes en las capas más altas de la atmósfera, y precipitadores (10) que retienen buena parte de los mismos en el interior de la propia planta.

### **5.3. Necesidades energéticas de la desalación**

Actualmente los requerimientos energéticos de los procesos desaladores provienen de la red de electricidad o de la combustión de combustibles fósiles (utilizados en la generación de la misma electricidad o para producir vapor de agua) [35], siendo los últimos la mejor fuente de energía desde un punto de vista económico [36].

Usualmente se trata de operar plantas con grandes producciones y aunque cada metro cúbico de agua producida a partir del agua desalada utilice poca energía, la energía total es muy grande [1] y su costo es cerca del 30% al 50 % de los costos totales del agua producida [3].

Para una apreciación más clara de la tendencia en la energía requerida por los distintos procesos de desalación, se presenta a continuación la Tabla 8 con una compilación de datos de distintas fuentes. Cabe señalar que en la tabla, los requerimientos energéticos para los procesos térmicos (EIME y EME) son virtualmente independientes de la concentración de sales, mientras que los requerimientos energéticos para los procesos de membrana son altamente dependientes de la concentración. Por esta razón, se proporciona información tanto para tratamiento de aguas salobres y agua de mar, vía ósmosis inversa.

**Tabla 8. Requerimientos energéticos de los procesos de desalación (kWh/m<sup>3</sup>)**

Referencia	EIME	EME	OI (Agua de mar)	OI (Agua salobre)
37	83.06	---	16.94	---
38	26.39	---	4.17 – 7.78	---
39	63.89	---	7.50	---
40	80.56	---	6.39 – 8.33	---
41	60.00 – 80.00	---	5.00 – 6.11	3.06
42	---	---	3.06	---
43	---	---	4.17 – 7.78	---
44	26.39 – 70.00	29.72 – 36.67	---	---
45	---	26.39 – 76.39	---	---
46	---	42.22	---	---
47	---	---	2.39	---
48	---	---	3.89 – 5.56	---
49	---	---	3.89	2.00
50	---	---	5.00 – 6.67	---
51	---	---	3.00 – 4.50	---
52	---	---	3.00 – 10.00	---

De manera específica, se presentan en la Tabla 9, los consumos de energía eléctrica de uso mecánico para los procesos térmicos. Cabe señalar que éste consumo puede llegar a ser menor que para el proceso OI debido a algunos factores como la cogeneración y venta que permiten a las plantas térmicas autoabastecerse de energía ó vender parte de la que producen para otro tipo de procesos, además de que no requieren tanta presión para el bombeo de las corrientes..

**Tabla 9. Consumo eléctricos de las plantas EIME y EME**

Tecnología evaporación	Consumo específico (kWh/m <sup>3</sup> )
EIME	3.5 – 4.0
EME	1.5 – 2.0

Los valores de la Tabla 8, para cualquier tecnología, presentan variaciones que son resultado de distintos factores como la diferencia de tamaño o capacidad, configuración del proceso, avances tecnológicos y calidad del agua de alimentación a tratar, además de consideraciones distintas para los cálculos efectuados por los autores de las referencias para obtener los resultados.

Pese a estas variaciones, la comparación del proceso EIME con el proceso OI en cualquier referencia donde se encuentren ambas, nos lleva a la conclusión de que es mayor el consumo para la tecnología EIME, además de que de manera específica para la referencia 44 es notable el

hecho de que puede llegar a elevarse a  $70 \text{ kWh/m}^3$  el consumo de energía de este proceso mientras que para el proceso EME sólo llega a  $36.67 \text{ kWh/m}^3$ . Por otro lado, se aprecia que el consumo para EME sobrepasa los  $20 \text{ kWh/m}^3$  para cualquier referencia mientras que para OI de agua de mar no sobrepasa este valor y para OI de agua salobre no sobrepasa  $5 \text{ kWh/m}^3$ . Lo anterior, brinda la oportunidad de establecer que el consumo en orden ascendente para las tecnologías comparadas se encuentra de la siguiente manera: OI salobre < OI agua de mar < EME < EIME dado que los primeros solamente son requerimientos mecánicos mientras que los segundos son mecánicos y térmicos.

#### **5.4. Uso de la energía e implicaciones ambientales**

La desalación de aguas requiere una aportación externa de energía, en cualquiera de sus formas, ya sea en forma de vapor o en energía eléctrica [25]. Cuando se considera el consumo de energía de los procesos de desalación, las características del agua alimentada son fundamentales ya que, por ejemplo, para el sistema OI, la presión de operación es una función de la salinidad del agua de alimentación. Podemos distinguir entre agua con baja salinidad (menor a 2,000 ppm); agua salobre (típicamente 2,000-10,000 ppm), agua altamente salobre (arriba de 10,000 ppm) y finalmente agua de mar (con intervalo usualmente entre 35,000 y 38,000 ppm). Bajo los requerimientos legales Europeos, el agua potable tiene una salinidad menor a 500 ppm y la energía requerida, como lo vimos anteriormente es algo considerable; sin embargo, esa cantidad ha ido disminuyendo constantemente porque, regresando a los 70s, cuando la tecnología empezaba a comercializarse, algunas veces eran requeridas cantidades del orden de 20 kWh para desalar un metro cúbico de agua.

Sin embargo, la presión de operación para forzar el agua a través de las membranas sigue siendo alrededor de 70-75 atm. Consecuentemente, la desalación sigue siendo considerada como una forma de suministrar agua dulce que es costosa y utiliza mucha energía.

Dependiendo del proceso, el consumo de energía en las plantas desaladoras viene determinado por el parámetro consumo específico de energía, que nos determina la relación entre la cantidad de energía eléctrica consumida por cada metro cúbico de agua producida y desalada, expresada en  $\text{kWh/m}^3$ , de esta manera, como se presentó anteriormente, para  $1 \text{ m}^3$  de agua producida,

desde 12 hasta 80 kWh de energía térmica y de 3.5 a 4 kWh de energía eléctrica son requeridos en plantas EIME que poseen una temperatura máxima de operación de 120°C. Estos datos son menores para plantas EME, dado que operan a temperaturas más bajas [ $<70^{\circ}\text{C}$ ] y requieren de 6 a 40 kWh de energía térmica y 1.5 a 2 kWh de energía eléctrica por metro cúbico de agua producida, mientras que los procesos de OI requieren entre 2 y 7 kWh por metro cúbico producido, la magnitud de los valores anteriores depende del tamaño de la planta y de los sistemas de recuperación de energía instalados ya que pueden implementar dispositivos más eficientes [24]. Para ilustrar estas cifras, puede estimarse que una planta de OI de tamaño medio con una capacidad de aproximadamente 25,000 m<sup>3</sup>/día y una demanda energética de 5 kWh/m<sup>3</sup> consume aproximadamente 125,000 kWh al día.

La planta puede suministrar de agua a cerca de 48,000 hogares de 4 personas (asumiendo un consumo de agua de 130 litros por persona durante un día), mientras que la energía que es usada para el proceso de desalación puede suministrar con corriente eléctrica cerca de 10,300 hogares de cuatro personas (suponiendo una demanda promedio de electricidad de 4,430 kW/año para un hogar de cuatro personas). Las preocupaciones ambientales asociadas con la demanda de energía se encuentran indirectamente asociadas con la emisión de contaminantes del aire (en especial el CO<sub>2</sub>) contribuyendo a aumentar el efecto invernadero, aguas de enfriamiento de plantas de generación de energía eléctrica así como con la fuente del combustible y su transportación [22].

Los impactos ambientales surgidos de los requerimientos energéticos son muy dependientes de la fuente de energía usada. En esta perspectiva, el mayor inconveniente de la tecnología de desalación es que actualmente mucha de su energía deriva de la quema de combustibles fósiles. Las termoeléctricas de generación de potencia provocan gases de efecto invernadero (además exacerbando los cambios climáticos) y producen otras emisiones contaminantes: para OI, típicamente alrededor de 2 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, 4 g NO<sub>x</sub>/m<sup>3</sup>, 12 g SO<sub>x</sub>/m<sup>3</sup> y 1.5 g NMVOC<sup>10</sup>/m<sup>3</sup>; para EIME o EME: alrededor de 20 kg, 25 g, 27 g y 7 g respectivamente [22].

En un estudio [52] se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida (centrado en el impacto de un producto en cada etapa de su vida, desde “la cuna a la tumba”) de varias tecnologías de desalación, que reveló que las cargas ambientales y emisiones al aire asociadas al sistema OI son

---

<sup>10</sup> Compuestos orgánicos volátiles sin metano.

de un orden de magnitud más bajo que las correspondientes a los procesos térmicos EIME y EME, lo que es coincidente con los valores reportados en el párrafo anterior.

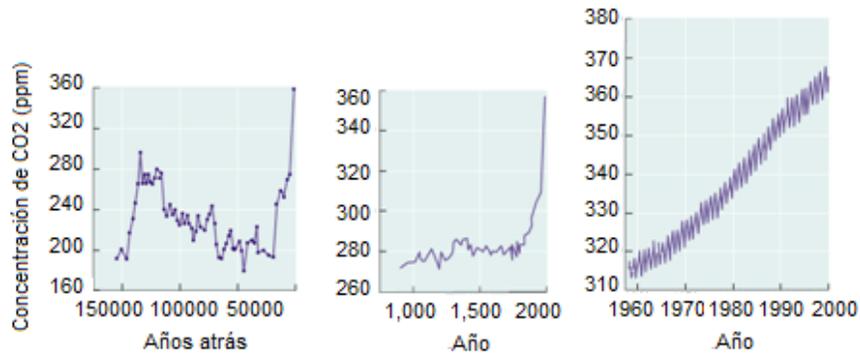
### **5.5. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El CO<sub>2</sub>, a temperatura ambiente, es un gas incoloro e inodoro, ligeramente ácido y no inflamable. Cuando alcanza los -78°C se vuelve sólido y se hace líquido cuando se disuelve en el agua, aunque si la presión desciende escapará al aire, produciendo una masa de burbujas.

El dióxido de carbono es uno de los gases más abundantes en la atmósfera y juega un papel importante en los procesos vitales de plantas, animales y, en definitiva del ser humano, como en la fotosíntesis, la respiración o en diversas actividades internas del cuerpo humano. El CO<sub>2</sub>, en cantidades adecuadas, es uno de los gases de efecto invernadero que contribuye a que la Tierra tenga una temperatura habitable. Y es que sin el CO<sub>2</sub>, la Tierra sería un bloque de hielo.

Sin embargo, un exceso de CO<sub>2</sub> provoca una subida de la temperatura, dando lugar al calentamiento global (reduciendo la emisión de calor al espacio), del que se sospecha que puede provocar un aumento de la actividad de las tormentas o el derretimiento de las placas de hielo de los polos, lo que provocará diversos problemas ambientales, como inundaciones en los continentes habitados, además, el aumento de temperatura podría provocar la emisión de las grandes cantidades de CO<sub>2</sub> que se encuentran disueltas en los océanos, entrando así, en un círculo vicioso.

Con diversos estudios, los científicos han detectado que los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera son los mayores desde que se tiene constancia, produciéndose un aumento sustancial y acelerado durante los últimos 3 siglos, es decir, desde el inicio de la revolución industrial. La Figura 11 muestra la tendencia que ha tenido la concentración de CO<sub>2</sub> a través de distintos períodos de años, donde la segunda gráfica ilustra lo anteriormente escrito [53].



**Figura 11. Evolución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera**

El incremento de las emisiones de dióxido de carbono, provoca alrededor del 50-60% del calentamiento global. La combustión de combustibles fósiles, como se vio anteriormente, para la generación de energía causa aproximadamente del 70-75% de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para restringir las emisiones de gases invernadero, principalmente CO<sub>2</sub>, se rubrica en diciembre de 1997 el protocolo de Kyoto, donde los países firmantes se comprometían a reducir estas emisiones en una media de 5.2 % hasta el 2012 respecto a los niveles de 1990.

### **5.6. Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de compuestos químicos gaseosos muy reactivos. Los más importantes son el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

El comportamiento químico de estos compuestos es complejo. El óxido nítrico es incoloro e inodoro, pero el dióxido de nitrógeno es un gas de color marrón y olor penetrante.

Estos gases pueden originarse de forma natural o, como se ha dicho anteriormente, por la actividad humana, como el caso de la desalación, siendo producidos por la combustión de combustibles fósiles como petróleo, carbón o gas natural.

Además de incrementar el efecto invernadero, los NO<sub>x</sub> tienen efectos nocivos sobre el sistema respiratorio. Se ha demostrado que exposiciones prolongadas a dióxido de nitrógeno, pueden disminuir los niveles de la función pulmonar y aumentar el riesgo de padecer síntomas respiratorios que pueden llegar a relacionarse con cáncer de pulmón, especialmente en personas

asmáticas y en niños, más vulnerables al tener una frecuencia respiratoria mayor que los adultos, mientras que la exposición en períodos cortos son, la irritación en los ojos, nariz y garganta, edema pulmonar, decremento de la función pulmonar, bronquitis y neumonía [54].

En determinadas condiciones ambientales tienen un efecto indirecto importante sobre la salud humana, pudiendo provocar enfermedades respiratorias y cardiovasculares, ya que contribuyen a formar contaminantes de origen fotoquímico (como el smog), al descomponerse en óxido nítrico y oxígeno atómico y reaccionar con una molécula de oxígeno por la acción de la luz solar [54], también su reacción con sustancias químicas producidas por la luz solar lleva a la formación de ácido nítrico, uno de los principales constituyentes de la lluvia ácida junto con el ácido sulfúrico [56].

No existen estudios concluyentes sobre la relación concentración – respuesta por exposición al NO<sub>2</sub>; sin embargo, sobre la base de datos clínicos, se ha propuesto que el valor guía apropiado, en el cual no existirían riesgos para la salud humana, es de 200 µg de NO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> en un tiempo máximo de 1 hora por día [54].

## **5.7. Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)**

Al igual que las emisiones anteriores, las de SO<sub>x</sub> se suelen separar en antrópicas y naturales. En las primeras, como bien se sabe, se encuentran las asociadas a la quema de combustibles fósiles, como el caso de la desalación para la generación de energía, la quema de biomasa y la fundición de metales, representando el 75% de las emisiones totales de azufre e la tropósfera.

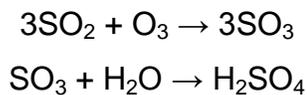
Existen diversos estudios que indican los efectos en la salud de las personas de los compuestos oxidados de azufre, así como la agricultura y también en la atmósfera y el clima. A continuación, se presentan en forma resumida algunos de los impactos de estos compuestos.

Se reconoce al azufre como un contaminante capaz de causar daño severo a la salud de las personas, en especial entre los infantes, los ancianos y los asmáticos. Ante altas concentraciones de SO<sub>2</sub> se pueden producir efectos severos como bronco constricción, bronquitis crónica, bronco espasmos en asmáticos, etc. Según la OMS, exposiciones de la población a una media diaria

mayor a  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  produce un exceso de mortalidad, en tanto que para exposiciones entre  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se observa un aumento de las enfermedades respiratorias agudas. Por último, para exposiciones a una media anual mayor a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se produce un aumento de los síntomas o enfermedades respiratorias.

Los efectos sobre la vegetación y la agricultura dependen de una serie de factores, entre ellos el tiempo de exposición y características morfológicas de las plantas, tales como el tamaño de la hoja y el índice de área foliar (cantidad de superficie de hoja). Se estima que las concentraciones existentes de  $\text{SO}_2$  podrían provocar daño en los cultivos e incluso ocasionar pérdidas en la productividad.

La deposición ácida de  $\text{SO}_x$  ( $\text{SO}_2$  y sulfato) y otros compuestos acidulantes ha sido observada en diversos estudios [51]. La oxidación del dióxido de azufre a trióxido de azufre puede producirse por la reacción con ozono. La reacción ocurre de forma espontánea en las capas altas de la atmósfera. El trióxido de azufre al reaccionar con el agua presente en las nubes produce ácido sulfúrico, el cual disminuye el pH del agua y precipita en forma de lluvia ácida.



Se conocen los efectos de la lluvia ácida en ecosistemas terrestres sensibles en Europa, América del Norte y China, en tanto, en el resto del mundo sus efectos son menos conocidos.

Entre los efectos que la lluvia ácida puede causar en la salud de los seres humanos, destaca:

- Opacamiento de la córnea (queratitis).
- Dificultad para respirar.
- Inflamación de las vías respiratorias.
- Irritación ocular por formación de ácido sulfuroso sobre las mucosas húmedas.
- Alteraciones psíquicas.
- Edema pulmonar.
- Bronquitis.
- Paro cardíaco.

- Colapso circulatorio.
- La evaporación rápida del líquido puede producir congelación.
- La sustancia puede causar efectos en el tracto respiratorio, dando lugar a reacciones asmáticas, espasmos reflejos, para respiratorio.
- La exposición puede producir la muerte.

Las inmisiones húmedas y secas provenientes de la atmósfera constituyen las fuentes más importantes de acumulación del azufre en el suelo. Las partículas secas consisten principalmente en  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{NH}_4)_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$ ,  $\text{CaSO}_4$  y  $\text{MgSO}_4$  con un pequeño porcentaje de compuestos de azufre orgánico. El  $\text{SO}_2$  y los productos de su transformación son los principales responsables de la acidificación de los suelos, especialmente cuando los sistemas de amortiguación del suelo no pueden neutralizar a los ácidos que ingresan por deposición directa o por transformación de los sulfatos sólidos. Los daños que se originan no dependen específicamente de la sustancia. Casi todas las reacciones en el suelo dependen del pH: tanto la desorción de muchas sustancias que producen efectos adversos como el deslavado por percolación (paso lento de agua a través de materiales porosos) de los nutrientes aumentan a medida que se va incrementando el grado de acidificación de los suelos [57].

### **5.8. Compuestos orgánicos volátiles diferentes de metano (COVDM)**

Los COVDM son compuestos formados principalmente por hidrocarburos a los que se les une alguno de los siguientes grupos químicos: alcoholes, aldehídos, alcanos, aromáticos, cetonas y derivados halogenados. Se caracterizan por ser sustancias vaporizables a temperatura ambiente, y muchos de ellos son incoloros e inodoros.

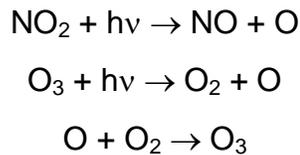
De la misma manera que sucede con los compuestos anteriores, los COVDM pueden provenir de la vegetación o fuentes antropogénicas, en ésta última se encuentran el sector de transporte y la combustión para la generación de energía, donde entra la desalación de agua marina.

Los COVDM, en función de su composición y toxicidad, pueden ser extremadamente peligrosos para la salud humana, como por ejemplo, el benceno, el cloruro de vinilo y el 1,2 dicloroetano, que son cancerígenos y producen efectos psicológicos adversos.

Con respecto a su incidencia en el medio ambiente, éstos compuestos precursores de ozono, es decir, que al mezclarse con otros contaminantes atmosféricos, como los  $\text{NO}_x$ , y reaccionar con la luz solar, son capaces de formar ozono a nivel de suelo, que es nocivo para el ser humano, y el principal agente que contribuye al smog fotoquímico [58].

### 5.9. Ozono ( $\text{O}_3$ )

El ozono situado en la estratósfera protege la vida en la Tierra al absorber parte de los rayos ultravioleta del sol. En la tropósfera se forma el  $\text{O}_3$ , producto de la reacción entre los  $\text{NO}_x$  y los COVDM en presencia de radiación solar. La reacción que se lleva a cabo es la siguiente:



Donde  $h\nu$  = fotón de luz solar

El  $\text{O}_3$  es una forma alotrópica del oxígeno, de color azul pálido. Además, el  $\text{O}_3$  es un oxidante muy fuerte que ataca al hule sintético, decolora textiles, pinturas y provoca daños en la vegetación, al reducir su capacidad de fotosíntesis y consecuentemente la producción de alimentos.

El  $\text{O}_3$  es el principal componente del smog o niebla fotoquímica y provoca daños en la salud de las personas, sobre todos en ancianos y niños. Entre otros efectos, el  $\text{O}_3$  causa irritación severa en la nariz, ojos y garganta, constricción en el pecho, dificultad en la respiración y reducción en la capacidad forzada (volumen de aire que puede expulsarse de los pulmones partiendo de la posición de inspiración completa. Corresponde a la capacidad inspiratoria más el volumen de reserva espiratoria [60]). Además, provoca cambios en la función pulmonar y un aumento en las infecciones respiratorias porque afecta a las funciones de los macrófagos (células del sistema inmunitario). Finalmente el  $\text{O}_3$  empeora las enfermedades crónicas como son el asma, bronquitis, enfisema pulmonar y trastornos cardiacos. La OMS propone como valor guía,  $120 \mu\text{g O}_3 / \text{m}^3$ , para máximos promedio de 8 horas [54].

Dados las emisiones de gases de efecto invernadero por la desalación y sus posibles efectos en el ambiente y la salud, en el capítulo 6, serán presentadas medidas de mitigación y/o formas de energía que puedan sustituir la demanda de energía proveniente de los combustibles fósiles y que permitan reducir éstas emisiones a la atmósfera y los impactos provocados, coadyuvando a la sustentabilidad de las tecnologías de desalación.

## **CAPÍTULO 6**

### **MEDIDAS DE PREVENCIÓN, MITIGACIÓN Y COMPENSACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES**

Como se presentó anteriormente, las cuestiones clave de los impactos ambientales de la desalación son la salmuera de rechazo y descarga de químicos al ambiente marino, y la emisión de contaminantes al aire, provocada por la demanda de energía de los distintos procesos. Para salvaguardar el uso sustentable de las tecnologías de desalación, los impactos de cada proyecto deberían ser investigados, prevenidos, mitigados y/o compensados a través de acciones basadas en un proyecto específico de evaluación de impacto ambiental (EIA) [18]; sin embargo, a continuación serán presentadas, de manera general, medidas de prevención, mitigación y compensación, que den pie a un estudio más avanzado y adecuado de las soluciones para un determinado proyecto [30].

#### **6.1. Descripción de las estrategias o sistema de medidas preventivas**

Se han ideado las siguientes medidas bajo la categoría de prevención debido a que son concebidas desde el momento de diseñar el Proyecto Ejecutivo y/o implementadas como buenas prácticas de ingeniería y bioética desde el inicio de los trabajos:

P1. El tiempo que permanezcan los materiales edáficos (materiales del suelo que son soporte de las plantas) en condiciones de inestabilidad comprometida, será mínimo

Las maniobras de desmonte, despalde, relleno y nivelación, por lo regular tienen como resultado, la ruptura de la matriz edáfica en partículas de diversos tamaños, lo cual los deja expuestos a ser arrastrados por elementos de intemperismo o bien los deja susceptibles a sufrir movimientos por gravedad, al carecer de las estructuras vegetales de fijación. La programación de tiempos y movimientos del material, reduce el riesgo de accidentes con la maquinaria y durante las maniobras.

P2. Programar la ejecución de las obras, durante las épocas de menor incidencia de lluvias

Es necesario que las actividades sean bien programadas a fin de evitar la coincidencia de temporadas de fuertes vientos y principalmente de lluvias, con la intención de minimizar la probabilidad de arrastre de partículas hacia sistemas ambientales circundantes, tal como el medio marino o zona de playa.

P3. Prohibir la realización de labores de mantenimiento de maquinaria y equipos en la zona de obras. De ser posible se deben colocar letreros que indiquen textual y gráficamente esta condición

De manera anticipada a cualquier actividad que requiera el uso de maquinaria o equipos mecánicos, los prestadores de servicios serán notificados de esta medida, teniendo la finalidad de prevenir derrames de sustancias dañinas sobre los elementos puntuales del medio y evitar una posible dispersión en el entorno. De forma complementaria, se contempla colocar letreros que marquen esta condición en la zona de obras, ello permitirá mantener informados a los operarios.

P4. Definir las áreas para alimentación y descanso

Es común la invasión de los terrenos vecinos sobretodo en los intervalos de descanso entre jornadas o durante la hora de comida. Los tiempos de descanso o comida entre jornadas, si bien no impactan de manera directa al ambiente, por lo regular se asocian con el abandono de recipientes de comida, envolturas, botes y botellas de bebidas, platos desechables, etc., que de hecho tienen un tiempo de degradación muy largo y que se acumulan, pudiendo pasar tanto al subsuelo por arrastre de sus constituyentes o a sistemas hidráulicos municipales.

P5. Colocar recipientes para basura en sitios estratégicos según la afluencia o actividades a realizar, con el servicio de recolección periódica

Tanto actividades de preparación como la presencia de trabajadores tiene asociada la generación de basura diversa, siendo desechos que se acumulan, pudiendo pasar al subsuelo por arrastre o a sistemas municipales de aguas. La inclusión de sistemas de recolección de basura, abate considerablemente los efectos.

P6. Colocar sanitarios portátiles, de tipo seco o con mantenimiento suficiente según necesidades, durante las etapas de preparación del sitio y construcción

Es común la práctica de realizar necesidades fisiológicas en los terrenos aledaños a donde se realizan las obras, por lo cual, la contaminación de aguas y del suelo por fecalismo al aire libre puede ser disminuida al disponer sanitarios portátiles con mantenimiento periódico adecuado, mediante el uso de un sanitario por cada diez trabajadores.

P7. El diseño del pozo de infiltración deberá realizarse de conformidad a un estudio geohidrológico detallado con el fin de prevenir los problemas relacionados y con base en las especificaciones de construcción de pozos establecidas en la NOM-003-CNA-1996

Un aspecto fundamental de las actividades de construcción de las obras asociadas (pozo de extracción de agua salobre y pozo de infiltración de agua de rechazo), será el seguimiento de las especificaciones en la norma de referencia porque puntualizan las actividades para prevenir la contaminación del acuífero a explotar y el medio edáfico en contacto en caso de utilizar beachwells.

P8. Implementar un programa de flora y fauna, para las especies con importancia relevante, donde se defina de manera muy específica la ubicación en el área de trabajo, características y acciones de protección

P9. Métodos de pretratamiento alternativos

El uso de métodos de pretratamiento alternativos deberían ser considerados cuando sea factible, tales como la prefiltración con membranas de ultrafiltración o microfiltración, o el uso de tomas del subsuelo como los pozos, vistos anteriormente, que prefiltren naturalmente el agua de alimentación. Esto podría eliminar o reducir significativamente la necesidad de sustancias de pretratamiento. Un tratamiento no químico opcional es la irradiación de la toma de agua con luz UV a 200-300 nm de longitud de onda para la desinfección, que daña la estructura del ADN de microorganismos. Una mayor ventaja de la luz ultravioleta es que se prevé el almacenamiento, manejo y disposición de químicos tóxicos.

P10. Con el fin de prevenir los impactos de las tomas abiertas, una combinación de pantallas enmalladas de diferente manera y una toma de agua de baja velocidad se deben considerar

Esto puede minimizar el choque y el arrastre de organismos más grandes, tales como peces o tortugas, mientras que el arrastre de organismos más pequeños como el plancton, huevos y larvas puede ser minimizado colocando tomas lejos de las áreas productivas, esto es, en aguas más profundas, en alta mar o subterráneas (v. gr. Pozos de playa [beachwells]<sup>11</sup>).

#### P11. Prevención de derrame de combustible y/o lubricantes

Todo equipo, vehículo y maquinaria debe contar con herramientas y materiales para actuar en casos de derrames de combustibles y/o lubricantes, tales como picos, material absorbente y depósitos adecuados para recojo de suelos contaminados.

### **6.2. Descripción de las estrategias o sistema de medidas de mitigación**

Este tipo de medida de control no evita la ocurrencia de un impacto, sino solamente reduce su magnitud y/o importancia y por tanto, tiene implícitos impactos residuales. Por tal motivo, es necesario incluir un descriptor del impacto residual.

Se identifican las siguientes medidas de mitigación:

#### M1. El proyecto ejecutivo, respetará en la medida de lo posible, las geoformas del terreno

Muchos proyectos realizados sin el conocimiento del terreno, pueden requerir una transformación total de su geomorfología, incrementando la necesidad de realizar cortes, rellenos, etc. Con resultados costosos económica y ambientalmente.

Impacto residual. Los cambios morfológicos seguirán presentes pero serán mínimos con el afán de incrementar la estabilidad de los materiales y proteger la inversión y los impactos residuales serán irrelevantes ambientalmente.

---

<sup>11</sup> Serie de pozos verticales perforados cerca de la orilla del mar, conectados de la parte inferior con tubos horizontales, perforados y sumergidos.

M2. Se delimitaran las zonas de aprovechamiento, empleando señalización con banderolas o similar, a fin de evitar impactos ambientales en áreas distintas

Con mucha frecuencia, las actividades se realizan afectando grandes extensiones de terreno, sin ser estrictamente necesarias, es decir, no tiene objeto afectar una superficie sobre la cual no se realizará aprovechamiento alguno e incluso de predios vecinos, lo que además se traduce en costos innecesarios.

Asimismo, es común que maquinarias puedan pasar prácticamente sobre cualquier terreno, circulen por todo el predio, sin respetar las vías previstas o los terrenos aledaños, incrementando el impacto por las actividades.

Esta actividad pretende disminuir con su aplicación, la afectación sobre el área, limitándola exclusivamente a las áreas que por requisito serán empleadas para construir sobre ellas alguna obra o servicio.

Para ello, se deberá elegir alguna de las alternativas, para identificar las distintas áreas del proyecto, mediante el empleo de banderolas, las cuales serán señales restrictivas para realizar cualquier otra actividad no contemplada en el proyecto. La afectación se restringirá al lugar previsto, suministrando la información necesaria a los operadores y trabajadores del proyecto.

Impacto residual. En este caso, el impacto residual no será significativo porque no se verán afectadas otras áreas.

M3. Se respetará la integridad de los individuos vegetales, que no interfieran con el diseño del proyecto

Por desgracia y con mucha frecuencia, durante la preparación del sitio y la construcción, los trabajadores no conciben la importancia de no afectar más allá de lo requerido y sobretodo, los árboles y vegetación en el área de maniobras.

Impacto residual. La eficiencia de la medida no puede ser total y es posible una afectación “involuntaria”, sin llegar a significar una amenaza a su integridad.

#### M4. Triturar todo el material desmontado y distribuirlo en el área

Durante la preparación del sitio se generarán residuos orgánicos producto de la vegetación secundaria retirada, estos materiales tienen un valor que puede ser aprovechado y asimilado por el mismo sistema ambiental, conllevando el beneficio de minimizar el volumen de desechos generados por la obra.

Impacto residual. Es muy probable la dispersión de los residuos en el entorno, con poco aprovechamiento por el sistema al tratarse de elementos sin fijación.

#### M5. Los vehículos que participen en el movimiento de tierras, residuos e incluso materiales de construcción, estarán equipados de lonas o tolvas, que eviten la dispersión de partículas o caída de materiales durante el transporte

En vista de que existirán movimientos de tierras producto del desmonte y de residuos de obra hacia fuera del predio, así como el ingreso de materiales de construcción hacia el predio, es importante que los camiones que participen en estas actividades, cuenten con los equipos que reduzcan la suspensión de partículas y derrame de los materiales que transportan. El uso de lonas y tolvas y el no exceder la capacidad de los vehículos de transporte, aunado a velocidades moderadas, es alternativamente plausible.

Debido a que es común, que durante la carga o descarga de los materiales en las unidades de transporte, algunos restos de los materiales se queden en los rines de las llantas, así como en los nichos de refuerzos del chasis, se barrerán los materiales a fin de que los materiales en dichos sitios, no sean dispersos durante su trayecto. Si existe agua tratada disponible, incluso se verá la conveniencia de darles una lavada en rines, tolvas y carrocería para el mismo efecto.

Impacto residual. Es una medida con resultados moderados, se considera que reduce apenas un 50% el impacto que atiende, provocado por el mal estado de los caminos, la mala colocación de las lonas, la premura, y el desdén sobre la medida.

M6. Se mantendrán los materiales y/o residuos de baja cohesión permanentemente humectados y se intensificará la medida durante la ocurrencia de fuerte viento a fin de disminuir la dispersión de partículas

Durante las actividades que implican movimientos de tierras, desperdicios o residuos, carga y descarga de materiales, etc. Dados los tamaños de algunos de los materiales, es común, la suspensión de partículas fugitivas y por ende, el riesgo de dispersión se magnifica cuando se presentan fuertes fenómenos eólicos.

La utilización de agua tratada para la humectación de los materiales, está contemplada como una buena práctica de ingeniería; sin embargo, esta deberá intensificarse cuando la fuerza de viento sea tal, que haga susceptibles los materiales de suspenderse.

Impacto residual. El cumplimiento de esta medida evitará que la dispersión del polvo producto de las actividades, se reduzca en un 80%.

M7. Las actividades de preparación del sitio y construcción se limitarán a ciertos horarios

Cada vez con mayor frecuencia y con el afán de realizar las obras en los menores tiempos posibles, es frecuente realizar las actividades de construcción en tres turnos, lo cual incrementa en mucho la interferencia con los alrededores por las actividades antropogénicas en horarios nocturnos inclusive.

Impacto residual. La realización de impactos en horarios diurnos, mantendría el control de las emisiones de ruido, bajo los niveles permitidos y su encubrimiento con importantes ruidos de fondo, que no existirían en el horario nocturno.

M8. Todos los vehículos que participen en las actividades de preparación del sitio y construcción, estarán sujetos a estrictos programas de mantenimiento que aseguren y garanticen que su operación es óptima y sus sistemas anticontaminantes y silenciadores, estén conectados y operando regularmente

Impacto residual. El cumplimiento de este requisito operativo, se verá reflejado en una aportación mínima de contaminantes o ruidos por los vehículos empleados, así como disminución del riesgo por ruptura de sellos y empaques, medidas que mantendrán un costo a largo plazo menor por mantenimiento y conservación, e incluso por limpieza y restauración en caso dado.

M9. Establecer un programa de vigilancia, estímulo o persuasión para el cumplimiento de las restricciones a los trabajadores y visitantes

La deficiente cultura ambiental de los trabajadores, es un común denominador en la industria. Muchos proveedores, usuarios y visitantes, tampoco tienen las bases para adoptar conductas éticas y responsables sobre conservación del medio. Por lo que las medidas preventivas están condenadas al fracaso si no son apoyadas por la creación de la conciencia de conservación de nuestro entorno.

Impacto residual: Si durante la capacitación se abandona el sentido clásico de la conservación ecologista, y se adapta la responsabilidad legal en la que incurren los infractores, los resultados son más sensibles y se estima pueden reducir hasta en un 80% los impactos de la actividad.

M10. Colocar en la zona de trabajo de letreros que manifiesten la prohibición estricta y las consecuencias que traería de no acatar la disposición de capturar o recolectar todo tipo de ejemplares silvestres de flora o fauna

Impacto residual. Esta medida previene la ocurrencia de eventos hasta reducirlos a un mínimo, No obstante, el daño a flora o fauna del sitio puede presentarse a pesar de una adecuada programación de actividades.

M11. Ubicación cercana de plantas de generación de energía y plantas desaladoras

El volumen total de la toma de agua puede ser reducido cuando el agua de enfriamiento de las plantas de energía sirve como agua de alimentación de las plantas desaladoras, lo que minimiza, el uso de químicos, y los impactos de construcción y uso de tierra [18].

Impacto residual. La co-localización de plantas de desalación y energía debería ser considerada para plantas de gran tamaño donde sea posible.

#### M12. Dilución y dispersión de la corriente de rechazo

La corriente de rechazo de las plantas desaladoras puede ser prediluida con otras corrientes de rechazo donde sea aplicable, tales como el agua de enfriamiento de las plantas generadoras de energía.

El mezclado y la dispersión de la columna de descarga pueden ser mejorados instalando un sistema difusor, y localizando la descarga en un sitio oceanográficamente favorable que disipe rápidamente el calor y la salinidad, esto es, asegurar que la descarga se efectúe en áreas muy hidrodinámicas, donde las olas y corrientes actúen mezclando las diferentes capas de salinidad.

Impacto residual. Para analizar la difusión de la columna en un proyecto específico, las condiciones ambientales y operacionales deben ser investigadas a través de un modelado hidrodinámico, acompañado de mediciones de salinidad y temperatura para el cálculo de la densidad antes y durante la operación de la planta desaladora y para la observación de los impactos producidos por la dilución.

#### M13. Disipación adecuada del calor de la corriente

Para evitar los impactos de la alta temperatura, el desagüe debería lograr la máxima disipación del calor de la corriente de rechazo a la atmósfera antes de entrar en el cuerpo de agua en turno (v. gr. usando torres de enfriamiento).

Impacto residual, El uso de una trayectoria más larga o de torres de enfriamiento produciría un impacto visual y de elementos de construcción debido al mayor uso de terreno para la instalación de estos componentes.

#### M14. Selección adecuada del pre y postratamiento

Los impactos negativos de los químicos pueden ser minimizados haciendo un tratamiento a la descarga, mediante la sustitución de sustancias peligrosas, e implementando opciones alternativas de tratamiento. Especialmente biocidas como el cloro, que podría afectar extremadamente a organismos ajenos al objetivo en el sitio de descarga, deberían ser reemplazados o tratados antes de la descarga. Como se vio anteriormente, el cloro puede ser removido eficazmente con diferentes químicos, como SBS, tal y como se hace en las plantas OI, mientras que el dióxido de azufre y el peróxido de hidrógeno han sido sugeridos para tratar las corrientes de rechazo de las plantas térmicas.

Las aguas de retrolavado de los filtros deberían ser tratadas por sedimentación, deshidratación y deposición, mientras que las soluciones de limpieza deberían ser tratadas in situ, en instalaciones especiales de tratamiento o descargadas en un sistema de alcantarillado sanitario.

Impacto residual: Cabe la posibilidad de que el tratamiento elegido no sea el más adecuado, por ejemplo, el SBS podría hidrolizarse a temperaturas altas y provocar incrustación si es utilizado en las plantas térmicas.

#### M15. Cristalización

Existen dos maneras de utilizar la cristalización en relación a la desalación de agua marina para mitigar el impacto residual de la salmuera de rechazo:

La primera es aquella que consiste en congelar el agua y separar los cristales de hielo, teóricamente de agua pura, que se forman cuando se rebasa el punto de congelación de las soluciones salinas, independientemente de la concentración inicial. Por fusión posterior de los cristales se obtiene el agua pura. Otro método basado en el mismo principio de la cristalización, consiste en obtener, mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18.

Impacto residual: El rendimiento energético de este proceso es mayor que el de los procesos de destilación; sin embargo, diversos autores coinciden en que las dificultades tecnológicas de separación y lavado de los cristales han hecho que no se aplique industrialmente, además de que

no han sido suficientemente desarrollados pues siguen siendo probados con ensayos a escala reducida ya que el aislamiento térmico para mantener el frío debe mejorarse [55, 56].

La segunda manera corresponde al método de obtención de la sal materia prima para la sal de mesa, donde a través de salinas, situadas en lugares cálidos, se evapora el agua de mar mediante la acción del sol y de los vientos hasta la formación de los cristales de sal para poder secarlos, recogerlos y venderlos posteriormente. Este método es mayormente utilizado en lugares de nula altitud porque el agua de mar es fácilmente canalizada hacia las salinas; sin embargo, se puede utilizar con la salmuera rechazada de las plantas desaladoras en cualquier lugar siempre y cuando se tenga buena radiación solar lo que permitirá obtener ganancias adicionales a la producción de agua potable .

Impacto residual: Es necesario que se utilice en lugares con suficiente disponibilidad de acción solar y eólica y esas variables no son controlables desde el punto de vista del proceso.

#### M16. Asegurar la minimización de la cantidad y longitud de las tuberías y líneas de transmisión de energía

Asegurar las rutas de las tuberías de tal manera que ocurra un impacto mínimo ambiental para áreas sensibles.

Impacto residual: El impacto visual y sobre el material edáfico es inevitable. En ocasiones, algunas plantas se pueden localizar en sitios donde existan estructuras de tomas o desagües ya establecidos que ayudarán a la minimización del impacto evitando la construcción de más líneas.

#### M17. Protección auditiva

Se deberán señalar aquellas zonas donde sea necesario el uso de protección auditiva debido al exceso de los niveles permisibles de ruido.

Las excavaciones, montajes de estructuras y equipos electromecánicos, se limitarán a lo estrictamente requerido en la obra.

Evitar el paso innecesario de maquinaria pesada y en general, la instalación de cualquier fuente ruidosa próxima a las edificaciones cercanas.

Impacto residual: Desafortunadamente la mayoría de las actividades en las obras y plantas son fuente de ruido y éste seguirá existiendo pese al seguimiento de las medidas anteriores.

### **6.3. Descripción de las estrategias o sistema de medidas de compensación**

Por la naturaleza como se concibe este tipo de medidas, no presenta impactos residuales y solamente en su caso, debe presentar impactos benéficos que como su nombre indica, compense el costo ambiental adverso del proyecto.

Se identifican las siguientes medidas de compensación:

C1. Las estructuras del proyecto (incluyendo obras asociadas), serán protegidas por una malla ciclónica la cual tendrá cintas plásticas diagonales color verde en todo su cuerpo, utilizadas para reducir el impacto sobre el paisaje.

C2. Retirar de la zona toda instalación temporal o material de descarte o no utilizado

C3. Restituir las características morfológicas de la playa afectada, en zonas no afectadas por la estructura de la obra proyectada.

C4. Promoción de la playa y/o otras áreas de valor turístico en coordinación con el gobierno local.

### **6.4. Uso de la energía**

El uso de la energía es uno de los principales factores de costo en la desalación de aguas y la cantidad necesaria de energía ha sido reducida por algunas innovaciones técnicas, tales como el uso de equipo de recuperación de energía o bombas de frecuencia variable, en el caso de las plantas OI. Un consumo bajo específico de 2-2.3 kWh/m<sup>3</sup> ha sido reportado para una planta

desaladora de agua de mar que usa un sistema de recuperación de energía que consta de un pistón tipo acumulador y una bomba de baja presión [62].

Además, el potencial del uso de sistemas integrados de energía renovable (solar, eólica, geotérmica, biomasa) así como el uso de ciclos combinados, debería ser investigado para minimizar los impactos en la calidad del aire y el clima [18]. Por ejemplo, hasta una reducción de 80-85% de las cargas ambientales puede ser lograda.

Las cargas ambientales de cualquier proceso pueden ser, preventivamente, reducidas de manera considerada con sistemas de producción de energías renovables [24] Sin embargo, algunas cuestiones siguen en pie sobre el impacto de las mismas energías renovables sobre el ambiente.

## **6.5. Energías renovables**

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa fuente de suministro que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables se encuentran la hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica, maremotriz, la biomasa y los biocombustibles.

### **6.5.1. Energía alternativa**

Un concepto similar, pero no idéntico es el de las energías alternativas: una energía alternativa, o más precisamente una fuente de energía alternativa es aquella que puede suplir a las energías o fuentes de energía actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. Según esta definición, se incluye a la energía nuclear dentro de las energías alternativas, ya que generan muy pocos gases de efecto invernadero.

### **6.5.2. Clasificación**

Las fuentes de energía renovables pueden dividirse en dos categorías: no contaminantes o limpias y contaminantes. Entre las primeras:

- El viento: energía eólica.

- El calor de la Tierra: energía geotérmica.
- Los ríos y corrientes de agua dulce: energía hidráulica o hidroeléctrica.
- Los mares y océanos: energía maremotriz.
- El Sol: energía solar.
- Las olas: energía undimotriz.

Las contaminantes se obtienen a partir de la materia orgánica o biomasa, y se pueden clasificar directamente como combustible (madera u otra materia vegetal sólida), bien convertida en bioetanol o biogás mediante procesos de fermentación orgánica o en biodiesel , mediante reacciones de transesterificación y de los residuos urbanos.

Energía verde es otro término que describe a las fuentes de energía limpias que son respetuosas con el medio ambiente.

Existe cierta polémica sobre la inclusión de la incineración (dentro de la energía de la biomasa) y de la energía hidráulica (a gran escala) como energías verdes, por los impactos medioambientales negativos que producen, aunque se trate de energías renovables.

El estatus de energía nuclear como energía limpia es objeto de debate. En efecto, aunque presenta una de las más bajas tasas de emisiones de gases de efecto invernadero, genera desechos nucleares cuya eliminación no está aún resuelta.

Con la discusión anterior, se acepta la definición y clasificación de las energías renovables para el contenido de este trabajo.

## **6.6. Centrales eléctricas de origen renovable**

Los países de la Unión Europea en su conjunto, constituyen la principal potencia mundial en lo que al desarrollo y aplicación de energías renovables se refiere con objeto de establecer una efectiva lucha contra el cambio climático y de reducir la dependencia exterior en su abastecimiento energético ya que son una alternativa para disminuir la dependencia hacia el uso de combustibles fósiles.

El aumento del uso de la desalación debido al crecimiento demográfico e industrial hace necesario un crecimiento paralelo de las fuentes de energía. Como se mostrará más adelante, los sistemas de desalación impulsados por energías renovables son escasos, y usualmente tienen una capacidad limitada. Ellos representan menos del 1% del total de la capacidad de desalación en el mundo; sin embargo, muchas razones hacen que el uso de las energías renovables sea adecuado para la desalación del agua de mar:

- Localización de la planta. Muchas regiones áridas son áreas costeras y las fuentes de energía renovable están disponibles.
- Cambios estacionales. Frecuentemente, la demanda de agua fresca se incrementa debido al turismo, que se concentra normalmente en los tiempos en que la disponibilidad de energía renovable es alta, especialmente en el caso de la energía solar.
- Disponibilidad de energía. El suministro convencional de energía no siempre es posible en áreas remotas o islas pequeñas: por un lado por las dificultades en el suministro de combustibles fósiles, y por el otro, porque no hay una red de energía disponible o no es suficiente para impulsar una planta desaladora. En tales casos, el uso de los sistemas renovables permite un adecuado desarrollo socioeconómico usando los recursos locales.
- Autosuficiencia. Las energías renovables permiten la diversificación energética y prevén la dependencia de un suministro de energía. Estos aspectos son importantes, especialmente en los países menos desarrollados, que además tienen gobiernos inestables.
- Tecnología. El desarrollo y comercialización de los sistemas de desalación impulsados por energías renovables hace posible la exportación de tecnología y la cooperación entre países con bajo desarrollo.
- Impacto ambiental. Los procesos de desalación de agua son consumidores fuertes de energía. Entonces, los efectos ambientales de los combustibles fósiles son importantes. Nótese que la capacidad mundial de agua desalada es aproximadamente  $23 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{día}$  [61].
- Economía. En muchas islas Mediterráneas, los requerimientos de agua fresca hacen necesario el transporte de agua fresca en barco, con altos costos y condiciones higiénicas inapropiadas.
- Operación y mantenimiento. La operación y mantenimiento de los sistemas de energía renovable son normalmente más fáciles que los convencionales. Entonces, son más adecuados para áreas remotas.

- Perspectivas comerciales prometedoras. La reducción de costos de los sistemas de energía renovables han tenido significado durante las últimas décadas. Entonces, reducciones futuras así como el incremento de los precios de los combustibles fósiles podrían hacer posible la competitividad de la desalación de agua de mar impulsada por energías renovables.

Actualmente, muchas tecnologías de energía renovables son bastante maduras y podrían ser competitivas con energías convencionales. Algunas otras están bajo desarrollo o investigación.

Con respecto al acoplamiento de las tecnologías de desalación a los sistemas de energía renovables, es importante tomar en cuenta diferentes aspectos: consideraciones termodinámicas, características específicas de la localización de los sistemas y evaluaciones económicas. Si el sistema de desalación va a ser instalado en un área remota, la selección será acorde a los criterios dados por Abdul- Fattah [63]: simplicidad, fácil manejo, disponibilidad, madurez de la tecnología. Garantía de la producción de agua fresca, adecuación del sistema a las características de la ubicación, posibilidad de incremento futuro de la capacidad, eficiencia, entre otras [63].

### **6.6.1. Centrales eólicas**

Las centrales eólicas son sistemas de generación basados en aerogeneradores, equipos mecánicos que transforman la energía del viento en energía eléctrica, cabe señalar que la energía eólica es indirectamente provocada por el sol. Las turbinas de viento pueden ser clasificadas dependiendo de su potencia nominal ( $P_n$ ), de muy baja potencia ( $P_n < 10$  kW), baja potencia ( $P_n < 100$  kW), potencia media ( $100$  kW  $< P_n < 0.5$  MW) y alta potencia ( $P_n > 0.5$  MW) [62], actualmente podemos encontrar potencias máximas unitarias rondando los 3,000 kW, aunque en Alemania hay instalados prototipos de hasta 5,000 kW. Después de la energía solar, la energía eólica es la fuente de energía más ampliamente usada, principalmente en plantas de ósmosis inversa de poca producción por ser las de menores requerimientos energéticos, como se mostró en el capítulo 5; sin embargo, las fluctuaciones de la energía eólica podría arruinar los sistemas OI, por lo que un almacenamiento intermedio sería necesario, pero esto reduciría la energía disponible e incrementaría el costo de la planta [63].

Los aerogeneradores se agrupan en parques eólicos, instalaciones colectivas que engloban cierto número de estos dispositivos, donde la energía generada se unifica en una subestación antes de su suministro a la red. Los parques eólicos se suelen instalar en zonas montañosas con fuertes vientos, aunque también se pueden emplazar en la costa e incluso en el mar (instalaciones de alta mar) [62] como se muestra en la Figura 12, donde hay gran disponibilidad de recursos para la generación de energía eólica.



**Figura 12. Parque "off-shore" cerca de Copenhague<sup>12</sup>**

La eficiencia de conversión teórica aerodinámica máxima de la turbina de viento es de 59%; sin embargo, las propiedades fundamentales de las secciones de perfil aerodinámico moderno, utilizados para las hojas de turbinas eólicas de mediano y gran tamaño, limitan la máxima eficiencia alcanzable a aproximadamente el 48%.

En la práctica, la necesidad de economizar los costos de las hojas de las turbinas, tiende a conducir a la construcción de turbinas de hojas delgadas reduciendo la eficiencia a un 45%. El promedio de eficiencia anual de la mayoría de las turbinas es de la mitad de esta cifra. Esto se debe a la necesidad de apagar la turbina de viento en condiciones de vientos de baja o alta velocidad y de limitar la potencia una vez alcanzado el nivel nominal. Por otra parte, la reducción de la eficiencia media es causada por las pérdidas en el generador y por el hecho de que la máquina no siempre funciona en su punto óptimo de trabajo.

---

<sup>12</sup> Off-shore. Vocablo inglés para alta mar.

Un inconveniente de este sistema de generación es su escasa disponibilidad, que podría estar entre las 2,000 y 2,500 h/año, para los parques eólicos de nueva creación; sin embargo, aunque pareciese que este tipo de energía no tiene ninguna capacidad de crédito de energía para las plantas, no es así, puede reemplazar a combustibles fósiles, no obstante, se ve obstaculizada por la aceptación pública, necesidad de terrenos, impacto visual, ruido, interferencia de las telecomunicaciones que bien podrían resolverse con la instalación de parques eólicos marinos como el mostrado anteriormente.

Por otra parte, la disminución de costos de la energía eólica puede lograrse reduciendo los gastos de inversión, introduciendo métodos de diseño fiables y explotando los mejores sitios de viento disponibles.

Casi todas las turbinas de viento son del tipo eje horizontal y la mayoría de ellas tiene un rotor de tres palas; sin embargo, desde hace algunos años, se han construido máquinas con dos palas para reducir los costos y prolongar la vida útil de las mismas, haciéndolas más ligeras y más flexibles [28].

A continuación se presentan algunos casos del uso de la energía eólica en la desalación:

En 1984, una turbina de viento fue instalada en Los Moriscos (Gran Canaria, España) para impulsar una planta desaladora de aguas salobres. Es un sistema OI de 200 m<sup>3</sup>/día. La planta está conectada a la red como fuente de energía auxiliar cuando la energía eólica no es suficiente para la operación. El consumo de energía es de 5 kWh/m<sup>3</sup>.

En 1993, un sistema de desalación de agua de mar, impulsado por el viento, empezó a operar en Pájara (Isla Fuerteventura, España). Es una planta OI con una capacidad de 56 m<sup>3</sup>/día impulsada por un sistema híbrido diesel-viento. Consiste de 2 motores diesel y una turbina de viento de 225 kW. Este sistema híbrido suministra los requerimientos de energía para una villa de 300 personas.

En 1986 empezó la instalación de una planta OI en el Medio Oriente. Es una planta de 25 m<sup>3</sup>/día conectada a un sistema híbrido diesel-viento. En Drepanon, Achaia, cerca de Patras (Grecia), en 1995, la operación de otra planta, potenciada con energía eólica, comenzó. Finalmente, hay presentes otras instalaciones en:

- Isla de Suderoog (Mar del Norte) con 6-9 m<sup>3</sup>/día;
- Isla de Planier, Islas del pacífico de Francia, con 0.5 m<sup>3</sup>/h
- Isla de Helgoland, Alemania (2x480 m<sup>3</sup>/h);
- Isla de San Nicolás, Francia occidental (sistema híbrido diesel-viento)
- Isla de Drevec, Francia (convertidor de energía eólica de 10 kW)

Por otro lado, en el caso de las plantas térmicas, en la Isla de Borkum en el Mar del Norte, existe una planta para producir agua fresca de 0.3-2 m<sup>3</sup>/h. En la Isla de Ruegen (Alemania), hay otra con convertidor de energía eólica de 300 kW y 120-300 m<sup>3</sup>/día de producto.

### **6.6.2. Centrales de biomasa**

Las centrales de biomasa son instalaciones que permiten convertir en energía una amplia diversidad de combustibles energéticos, que se obtienen directa o indirectamente de recursos biológicos, conocidos como biomasa. La biomasa comprende una variada gama de materiales orgánicos cuyo origen es un proceso biológico. Pueden ser utilizados por combustión directa o por transformación en biocombustible [65]. Hoy en día, la combustión directa de la biomasa es comercial [62].

La potencia habitual para una central de biomasa de cierta entidad está comprendida entre los 10,000 y 20,000 kW, siendo el rendimiento del orden del 20-30%.

Uno de los mayores problemas que plantean es el aseguramiento del suministro constante de la materia prima. Una posible solución a esta dificultad podría pasar por la utilización de cultivos energéticos.

Donde exista una gran cantidad de residuos de biomasa, es posible impulsar procesos de destilación u otros procesos de desalación usando la conversión termo-mecánica o la generación de electricidad. El uso de biomasa en la desalación no es, en general, una alternativa prometedora, ya que los residuos orgánicos, normalmente, no están disponibles en regiones áridas, además de que el crecimiento de la biomasa para el uso en la desalación necesita mucha más agua fresca de la esperada como producto; no obstante, en un trabajo de Tesis [68] anterior a éste, de la misma Facultad (Química), se realizó un estudio sobre la producción de agua potable a

partir de la desalación de agua de mar mediante la generación de energía a partir de microalgas, en dicho estudio se concluyó que la generación de energía a través de las microalgas, para una planta de 100 m<sup>3</sup>/h utilizando el sistema OI y el sistema de compresión de vapor de la misma capacidad, reducía las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en 8,957 toneladas por año debidas al consumo energético y 6,584 toneladas por año debidas al consumo térmico, respectivamente. Reduciendo a su vez el precio del agua de 0.59 Euros/m<sup>3</sup> a 0.41 Euros/m<sup>3</sup> gracias a un subsidio del 35% generado por el uso de energía renovable.

Esto permite decir que, pese al uso de energías renovables para la desalación es una alternativa que deberá seguir en desarrollo e investigándose más para poder utilizarse en casos específicos dependiendo de sus características puesto que es posible que funcionen para algunas situaciones y para otras no.

La energía que se obtiene de la biomasa, tienen el mismo problema que la energía producida por combustibles fósiles: en la combustión emite dióxido de carbono, gas de efecto invernadero, y a menudo es aún más contaminantes puesto que la combustión no es tan limpia, emitiendo hollines y otras partículas sólidas. Se encuadran dentro de las energías renovables porque mientras puedan cultivarse los vegetales que las producen, no se agotarán. También se consideran más limpias que sus equivalentes fósiles, porque teóricamente el dióxido de carbono emitido en la combustión ha sido previamente absorbido al transformarse en materia orgánica mediante fotosíntesis. En realidad no es equivalente la cantidad absorbida previamente con la emitida en la combustión, porque en los procesos de siembra, recolección, tratamiento y transformación, también se consume energía, con sus correspondientes emisiones.

Además, se puede atrapar gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> para alimentar cultivos de microalgas/ciertas bacterias y levaduras (potencial fuente de fertilizantes y piensos, sal (en el caso de las microalgas de agua salobre o salada) y biodiésel/etanol respectivamente, y medio para la eliminación de hidrocarburos y dioxinas en el caso de las bacterias y levaduras (proteínas petrolíferas) y el problema de las partículas se resuelve con la gasificación y la combustión completa (combustión a muy altas temperaturas, en una atmósfera muy rica en O<sub>2</sub>) en combinación con medios descontaminantes de las emisiones como los filtros y precipitadores de partículas, o como las superficies de carbón activado.

También se puede obtener energía a partir de los residuos sólidos urbanos y de los lodos de las centrales depuradoras y potabilizadoras de agua. Energía que también es contaminante, pero que también lo sería en gran medida si no se aprovechara, pues los procesos de pudrición de la materia orgánica se realizan con emisión de gas natural y de dióxido de carbono.

### **6.6.3. Centrales solares**

La energía solar es una de las aplicaciones más prometedoras de las energías renovables para la desalación del agua de mar. Las centrales solares se encargan de convertir la energía del sol en energía eléctrica. Para realizar esta función se utilizan fundamentalmente tres tecnologías: centrales fotovoltaicas, centrales termosolares y centrales fototérmicas.

Las centrales fotovoltaicas basan su funcionamiento en el uso de celdas solares que convierten de forma directa la radiación solar en energía eléctrica. No poseen partes móviles y como resultado de esto, requieren un mantenimiento mínimo, además de que tienen una larga vida. Actualmente, la energía de origen fotovoltaico, con instalaciones de una potencia máxima del orden de algunos megawatts, se utiliza eminentemente para cubrir pequeños consumos térmicos o eléctricos, generando la electricidad, sin la emisión de gases de efecto invernadero o cualquier otro gas y su operación es virtualmente silenciosa. En la producción industrial, eficiencias de 13 a 15% podrían ser alcanzadas en celdas monocristalinas de silicio aunque se han reportado alcances de 18 a 24% y 10 a 11% en celdas policristalinas, siendo las últimas más baratas. En celdas de Arseniuro de Galio (GaAs) y sus aleaciones, como GaInP<sub>2</sub> (fosfato de galio-indio), eficiencias mayores a 30% (eficiencia ultraalta) han sido alcanzadas [62].

Una celda fotovoltaica está hecha por dos o más capas delgadas de material semiconductor, mayormente silicio, aunque también las hay de sulfuro de cadmio, sulfuro de cobre y arseniuro de galio. Cuando el silicio es expuesto a la luz, se generan cargas eléctricas y éstas son conducidas lejos a través de los contactos metálicos, como corriente directa (CD). La potencia eléctrica de una sola celda es pequeña, por lo que múltiples celdas son conectadas entre sí y encapsuladas (por lo general cubiertas por vidrio) para formar un módulo (también llamado panel), se puede interconectar cualquier número de paneles para obtener la potencia necesaria. La capacidad mundial instalada de celdas fotovoltaicas hasta finales de 2002 era de 2 gigawatts. Generalmente,

las celdas se conectan en serie a otras celdas, para producir un voltaje de 14 a 16 V de corriente directa, por lo tanto se utiliza un inversor para convertirla en corriente alterna de alto voltaje [28].

La energía solar fotovoltaica es una tecnología madura cuyo principal problema es su alto costo. Esta tecnología ha sido desarrollada en gran parte usando sistemas autónomos. La conexión de las celdas a los procesos de membrana en la desalación podría ser una alternativa interesante en áreas remotas; sin embargo, como se vio anteriormente, la desalación OI, presenta requerimientos significativos de químicos, partes de refacción y trabajadores preparados. La tecnología fotovoltaica conectada a los sistemas OI es actualmente comercial. El punto en que la energía fotovoltaica es competitiva con la energía convencional depende de la capacidad de las plantas, la distancia a la red eléctrica y la concentración de sales de la alimentación. Con respecto a las instalaciones de desalación solar, la Tabla 10 muestra algunos datos para plantas OI fotovoltaicas.

**Tabla 10. Plantas OI impulsadas por celdas fotovoltaicas**

<b>Localización de la planta</b>	<b>Concentración de sal</b>	<b>Capacidad de la planta</b>	<b>Sistema fotovoltaico</b>
Jeddah, Arabia Saudita	42,800 ppm	3.2 m <sup>3</sup> /día	8 kW máximos
Concepción del Oro, México	Agua salobre	1.5 m <sup>3</sup> /día	2.5 kW máximos
Norte de Jawa	Agua salobre	12 m <sup>3</sup> /día	25.5 kW máximos
Mar Rojo, Egipto	Agua salobre (4.4 g/L)	50 m <sup>3</sup> /día	19.84 kW máximos (bombeo), 0.64 kW máximos (control de equipos)
Hassi-Khebi, Argelia	Agua salobre (3.2 g/L)	0.95 m <sup>3</sup> /día	2.59 kW máximos
Cituis West, Jawa, Indonesia	Agua salobre	1.5 m <sup>3</sup> /h	25 kW máximos
Perth, Australia	Agua salobre	0.5-1 m <sup>3</sup> /h	1.2 kW máximos
Wanoo Roadhouse, Australia	Agua salobre	---	6 kW máximos
Vancouver, Canadá	Agua de mar	0.5-1 m <sup>3</sup> /día	4.8 kW máximos
Doha, Qatar	Agua de mar	5.7 m <sup>3</sup> /día	11.2 kW máximos
Desierto Thar, India	Agua salobre	1 m <sup>3</sup> /día	0.45 kW máximos
Noroeste de sucuka, Italia	Agua de mar	---	9.8 kW máximos + 30 kW de generador diesel
Parque estatal Santa Lucía, Florida, USA	Agua de mar	2x0.3 m <sup>3</sup> /día	2.7 kW máximos + generador diesel
Isla Lipari, Italia	Agua de mar	2 m <sup>3</sup> /h	63 kW máximos
Isla Lampedusa, Italia	Agua de mar	3+2 m <sup>3</sup> /h	100 kW máximos
Universidad de Almería, España	Agua salobre	2.5 m <sup>3</sup> /h	23.5 kW máximos

Algunas otras plantas fueron instaladas en:

- Isla Ohsima, Nagasaki (10 m<sup>3</sup>/h, agua de mar); Ciudad Fukue, Nagasaki (8.33 m<sup>3</sup>/h, agua salobre)
- Valle Spencer, Nuevo México, USA (2.8 m<sup>3</sup>/h, agua salobre)

El uso de un sistema híbrido eólico-solar impulsando una unidad desaladora es una alternativa prometedora dadas las características complementarias de ambas fuentes de energía y porque muchas áreas costeras tiene adecuados recursos eólicos y solares. Uno de esos sistemas fue diseñado en el marco del proyecto SOLERAS. Además, el centro de Cadarache (Francia) diseñó otra unidad que fue instalada en 1980 en Borj-Cedria, Túnez. El sistema consiste de un destilador solar compacto de 0.1 m<sup>3</sup>/día, con una planta OI de 0.25 m<sup>3</sup>/h y una planta de electrodiálisis para 4 g/L de agua salobre. El sistema energético consiste de un campo fotovoltaico de 4 kW máximos y una turbina de viento de 4 kW [62].

Por su parte, las centrales termosolares agrupan un conjunto de tecnologías que se caracterizan por concentrar la radiación solar, con el fin de calentar un fluido (normalmente aire, agua o aceite) que, al evaporarse, se expande en una turbina de vapor. Las tecnologías más usuales son la de alta temperatura (receptor central) o la de media temperatura (espejos parabólicos).

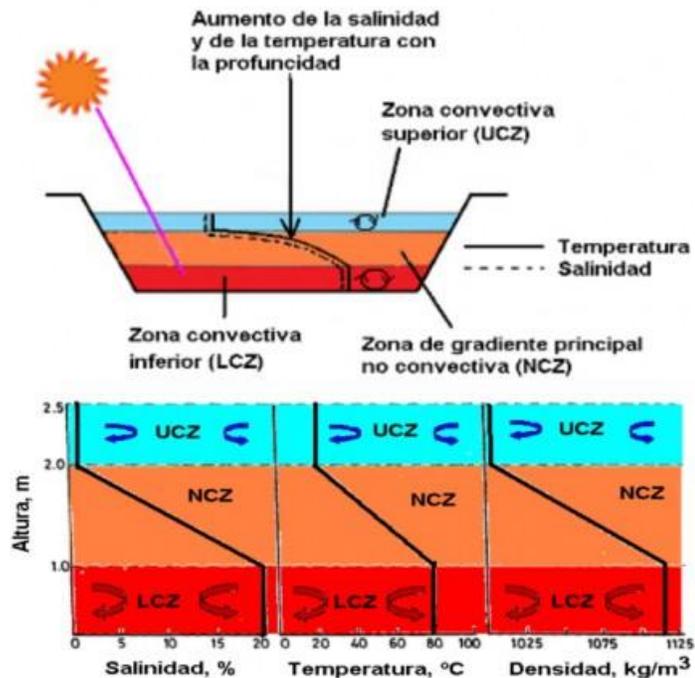
Al igual que en los parque eólicos, el único inconveniente que se percibe en este sistema de generación es su escasa disponibilidad, en el entorno de las 2,600 h/año [65].

Existe un antecedente del uso de la energía solar aplicada a procesos desaladores en Jordania, y en España se ha propuesto el uso de la energía eólica para la desalación bajo el esquema de operación independiente (generar y desalar donde la conveniencia económica sea mayor, aunque no haya coincidencia de las dos plantas en el mismo lugar). Por otro lado es conocida la utilización de la energía solar en la operación de plantas de canal parabólico en EUA, y de prototipos en otros lugares del mundo, así como de plantas experimentales de torre central para la generación de electricidad [1].

Un sistema de destilación solar consistirá de 2 dispositivos separados, el colector solar y el destilador (destilación solar indirecta) o de un sistema integrado (desalación solar directa). Los sistemas de producción pequeños como los destiladores solares podrían ser usados donde la demanda de agua fresca sea baja y el uso de tierra sea barato. Las demandas reales de agua

fresca requieren sistemas de capacidad industrial. Estos sistemas consisten de una planta convencional de destilación de agua de mar acompañada de un sistema termosolar.

Un derivado de las centrales termosolares son los estanques solares donde se calienta un estanque grande de agua, de tal forma que se suprimen las pérdidas de calor, que pueden ocurrir si al agua calentada (menos densa) se le permite subir a la superficie del estanque y perder energía, donándola al medio ambiente en forma de radiación o convección. Como se muestra en la Figura 13, este objetivo puede ser alcanzado, si se crea un estancamiento de gran transparencia, como zona de aislamiento en la parte superior del estanque para contener el líquido caliente en la parte inferior del estanque. En un estanque solar no convencional, parte de la radiación solar incidente es absorbida y convertida en calor, la cual es almacenada en las regiones bajas del estanque.



**Figura 13. Sección vertical a través de un estanque solar con gradiente salino**

Los estanque solares son ambas cosas, recolectores de energía solar y acumuladores térmicos. Lagos con gradiente salino, los cuales muestran un incremento en la temperatura de acuerdo con la profundidad, se producen naturalmente. Un estanque solar, con gradiente salino, sin convección, se compone de tres zonas:

- 1) La zona convectiva superior (UCZ), con una salinidad baja, casi constante y de una temperatura cercana a la temperatura ambiente. La UCZ, por lo general de 0.3 m es resultado de la evaporación inducida por el viento. Esta zona se mantiene tan delgada como sea posible, usando mallas supresoras de onda y rompe vientos, colocados cerca del estanque.
- 2) La zona no convectiva (NCZ), en la cual, ambas propiedades, salinidad y temperatura, se incrementan con la profundidad. El gradiente vertical de concentración de sal en la NCZ inhibe la convección y esto propicia el aislamiento térmico. El gradiente de temperatura se debe a la absorción de la radiación solar en el fondo del estanque.
- 3) La zona de baja convección (LCZ) es casi constante, con una alta concentración (relativa), generalmente 20% en masa, a alta temperatura. El calor es almacenado en la LCZ la cual es dimensionada para abastecer de energía cualquier sistema continuamente durante el año. Mientras la profundidad aumenta, la capacidad térmica también se incrementa; sin embargo, grandes profundidades incrementan el capital de inversión inicial y se requiere de tiempos más largos para la puesta en marcha.

Se pueden usar sales químicamente estables, como cualquier salmuera de origen natural, para construir los estanque solares. La sal seleccionada deber ser segura para ser manipulada, no tóxica, barata y fácilmente disponible. No debe reducir significativamente las características de transmisión de la radiación solar del agua y su solubilidad debe ser dependiente de la temperatura. Para la aplicación de los estanques solares se deben considerar una serie de factores:

- No debe contaminar los acuíferos y cualquier fuga continua de agua caliente, disminuirá la capacidad de almacenamiento térmico y su efectividad.
- Debe seleccionarse el revestimiento del estanque. Hoy en día todos los estanques utilizan uno construido en polímero reforzado de 0.75-1.25 mm de espesor, para evitar cualquier fuga térmica y/o problemas de contaminación del medio ambiente.
- Los estanques solares pequeños se han usado para el calentamiento de agua, mientras que los estanques más grandes, son propuestos para procesos de calentamiento industrial, generación de energía eléctrica y desalación.

Aunque se han hecho muchos estudios sobre la factibilidad de la generación de energía eléctrica a partir de estanques solares, el único sistema operacional se encuentra en Israel. Este sistema posee un estanque de 1,500 m<sup>2</sup>, usado para operar una turbina-generador tipo Rankine de 6 kW y otro estanque de 7,000 m<sup>2</sup>, que produce 150 kW de potencia, operando a 90°C.

Otro uso de la salida de un estanque solar con gradiente salino es la operación a baja temperatura de una unidad de destilación para desalar agua de mar. Este concepto tiene su aplicación en áreas desérticas, cercanas a los océanos. El estanque solar acoplado a la desalación involucra el uso de la salmuera caliente del estanque, como fuente térmica para la evaporación del agua que va a ser desalada a baja presión en un sistema EME. Esto representa otra solución para la salmuera de desecho de las desaladoras, como una fuente de energía térmica, para calentar la alimentación de las plantas, lo que puede incrementar su rendimiento [28].

Otra aplicación de la energía solar y quizá, una de las mejores son los generadores fototérmicos con 3 diferentes tecnologías desarrolladas: las plantas de concentración mediante canal parabólico, donde superficies reflectoras en forma de parábola enfocan la radiación solar en una línea en donde se encuentra un tubo absorbedor que lleva en su interior un aceite térmico. El aceite térmico puede llegar a calentarse hasta 350-400°C, luego, en un intercambiador de calor se produce vapor a alta presión el cual alimenta a una turbina de vapor convencional. Actualmente en California, Estados Unidos se encuentran en funcionamiento nuevas plantas con una capacidad instalada conjunta de 354 megawatts desde hace más de 10 años.

La tecnología solar de Torre Central consiste de un arreglo de espejos móviles que siguen el movimiento del Sol y enfocan su radiación en un receptor instalado en lo alto de una torre, donde el fluido de transporte de calor (agua, sal, o aire) es calentado entre 500 y 1000°C. Debido a las altas temperaturas esta energía puede ser acoplada directamente a una turbina de gas o a una planta de ciclo combinado. Se han propuesto plantas de 200 MW de capacidad y construido plantas de 80 MW.

La tecnología de plato parabólico utiliza espejos parabólicos y tienen un mecanismo de seguimiento solar. Estos dispositivos concentran la radiación solar en el foco donde se encuentra un absorbedor con un fluido térmico el cual se calienta y puede llegar a temperaturas en el rango de 600 a 1200°C. Estos sistemas son usualmente pequeños (10 kW de capacidad nominal) [68].

Una planta EIME o EME puede ser seleccionada para la desalación termosolar. Pocas plantas de desalación con colectores de espejos parabólicos han sido implementadas y probadas. En la plataforma solar de Almería (PSA), España, un colector solar parabólico fue conectado a una planta EME. En la segunda fase del proyecto, una bomba de calor de absorción de doble efecto fue introducida a la planta.

Colectores solares de placas planas han sido usados en pocas plantas piloto de desalación solar. Con respecto a colectores de tubo evacuado, se han reportado experiencias usando el proceso EME [69, 70].

Por otro lado, diferentes plantas han sido implementadas acoplando un estanque solar a plantas EIME o EME. En plantas de destilación solar, el agua de mar o salmuera precalentada por la planta de destilación, absorbe la energía térmica entregada por la zona de almacenamiento de calor del tanque solar. Además, la energía térmica entregada por un tanque solar de gradiente salino ha sido usada, no sólo en plantas de destilación de agua de mar, sino también en plantas OI de agua de mar y de aguas salobres. En [73] se describió una planta de desalación impulsada con estanques solares en el Paso, Texas. El estanque solar impulsa plantas térmicas y plantas OI. En [72] se analizó una planta EME impulsada por energía térmica entregada por un estanque solar, y algunos autores [73, 74] han seleccionado a la desalación potenciada con estanque solares como una de las tecnologías con mayor relación costo-efectividad.

La generación de electricidad solar también podría ser usada para la desalación de agua de mar. Una planta de enfriamiento asistida solarmente fue instalada en Yanbu, Arabia Saudita, como parte del proyecto SOLERAS. El colector solar consistía de 380 colectores con dos ejes para el seguimiento solar.

Además, la energía del eje proveniente de energía solar térmica podría impulsar un proceso OI o de compresión de vapor. Un prototipo de planta OI fue implementado con colectores de placas con freón (marca de refrigerante de DuPont compuesto por CFC, se encuentra como Freón 11 ó 12, triclorofluorometano,  $\text{CCl}_3\text{F}$  o diclorodifluorometano,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) como fluido de trabajo [62].

Muchos sistemas pequeños de desalación solar directa y plantas piloto de desalación solar indirecta han sido diseñados e implementados. La Tabla 11 muestra plantas pilotos de desalación solar indirecta.

**Tabla 11. Plantas de destilación solar**

<b>Localización de la planta</b>	<b>Proceso desalador</b>	<b>m<sup>3</sup>/día</b>	<b>Colector solar</b>
Isla La Desired, Caribe francés	EME, 14 efectos	40	Tubo evacuado
Abu Dhabi, EAU	EME, 18 efectos	120	Tubo evacuado
Kuwait	EIME, RO	25, 20	Sistema solar de generación de electricidad
Kuwait	EIME-autoregulada	100	Espejos parabólicos
La Paz, México	EIME, 10 etapas	10	Placas planas + espejos parabólicos
Golfo Árabe	EME	6000	Espejos parabólicos
Al-Ain, EAU	EME, 55 efectos, EIME, 75 etapas	500	Espejos parabólicos
Isla Takami, Japón	EME, 16 efectos	16	Placas planas
Margarita de Savoya, Italia	EIME	50-60	Estanque solar
El Paso, Texas	EIME	19	Estanque solar
Berken, Alemania	EIME	20	---
Universidad de Ancona, Italia	EME, Compresión de Vapor	30	Estanque solar
PSA, Almería, España	EME, bomba de calor	72	Espejos parabólicos
Area de Hzag, Túnez	Destilación	0.1-0.35	Colector solar
Safat, Kuwait	EIME	10	Colector solar
Cerca del mar muerto	EME	3000	Estanque solar

#### 6.6.4. Centrales hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas basan su funcionamiento en la conversión de la energía potencial del agua almacenada en un embalse, primero en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica [63]. Este recurso renovable supone una fuente energética limpia y autóctona que aprovecha los saltos de agua naturales o artificiales (lugares donde fluye el agua rápidamente perdiendo elevación mientras circula por una región con fuerte desnivel o por un acantilado). Para su explotación existe un costo nulo de combustible y sólo necesita la construcción de infraestructuras adecuadas. La primera central hidroeléctrica moderna se creó en Gran Bretaña, en 1880, cuando aparecieron las ruedas hidráulicas, posteriormente, con el desarrollo del generador eléctrico y el perfeccionamiento de la turbina eléctrica se produjo la gran evolución de esta energía. En la actualidad, alrededor del 20% de la electricidad empleada en el mundo procede de la energía hidroeléctrica, siendo Canadá y Estados Unidos las primeras potencias productoras.

La cantidad de energía que se logra con este procedimiento depende del cauce y los desniveles de altura que existen. Para su funcionamiento se requiere la construcción de pantanos, presas, canales de derivación, la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. El agua, una vez empleada, se devuelve río abajo.

También existen otros tipos de instalaciones, las minicentrales hidroeléctricas, que no necesitan de grandes embalses reguladores y provocan un menor impacto ambiental. La energía que se genera se reparte al usuario mediante subestaciones de transmisión, cables, conductores y acometidas (derivación desde la red de distribución de la empresa de servicio eléctrico hacia la edificación) [74].

Otro tipo de energía del agua es la proveniente del océano, que es expresada en muchas maneras, por ejemplo, energía de las olas, las mareas y el gradiente térmico del mar. La potencia nominal es 0.5, 240 y 40 megawatts, respectivamente. Hoy en día, existen muy pocas instalaciones para la conversión de la energía de las olas y mareas en electricidad.

El uso de la energía del océano para la desalación de agua de mar no es práctico actualmente porque no es comercial todavía, la energía de las mareas es costosa, y la energía del gradiente térmico del océano está todavía bajo investigación. Se ha descrito [76] un sistema EIME acoplado

a energía térmica del océano. Algunos estudios [78] mostraron que la desalación, usando la energía de las olas, sería económicamente viable para capacidades de  $10^6$  m<sup>3</sup>/día.

### **6.6.5. Energía geotérmica**

La energía geotérmica corresponde a la energía calorífica contenida en el interior de la Tierra, que se transmite por conducción térmica hacia la superficie, la cual es un recurso parcialmente renovable y de alta disponibilidad. El conjunto de técnicas utilizadas para la exploración, evaluación y explotación de la energía interna de la Tierra se conoce como geotermia.

La energía geotérmica utilizada para producir electricidad es la proveniente del calor de las rocas calientes que recubren un foco calórico. A través de perforaciones se inyecta agua fría, la cual, convertida en vapor producto de las altas temperaturas, por presión genera movimientos en turbinas generadoras de electricidad, siendo esta fuente de energía, una tecnología madura [78]. Las fuentes de energía geotérmica se clasifican en términos de la temperatura medida como baja, media y alta. Los valores correspondientes son menores a 100°C, entre 100 y 150°C, y arriba de 150°C, respectivamente [62].

La explotación de energía geotérmica está determinada por la existencia de fuentes de calor no muy profundas y cercanas a receptáculos hidrotérmicos (sistemas de termas o “aguas calientes”). La fuente de calor puede provenir de actividad volcánica o por fricción de placas tectónicas. El calor proveniente del interior de la tierra se propaga hacia la corteza terrestre, donde existen grandes zonas tectónicas con determinados gradientes geotérmicos, esto es, a mayor profundidad mayor aumento de la temperatura, en promedio, 1 grado Celsius cada 33 metros. En torno a zonas volcánicas, el flujo calórico alcanza valores muy superiores, del orden de 20 a 30 grados Celsius cada 100 metros; sin embargo, el flujo de calor es anormal en diferentes áreas continentales [62]. Es importante que las estructuras geológicas en el yacimiento o receptáculo sean permeables, pero a su vez permitan la conservación del calor y la presión del receptáculo. Es necesario, además, la existencia cercana de áreas de recarga hídrica del receptáculo, por la vía de infiltración de aguas meteóricas<sup>13</sup>, pluviales, de deshielos o mixtas [79].

---

<sup>13</sup> Aguas provenientes de fenómenos meteorológicos como nieve, granizo

La principal ventaja de la energía geotérmica es que el almacenamiento térmico es innecesario en tales sistemas. En 1996, se generaron 7,173.5 MW por energía térmica, y en 1994, 8,664 MW, fueron consumidos en otras aplicaciones.

La energía geotérmica que se ubica en los 100 metros más altos de la corteza terrestre podría resultar una alternativa razonable para la desalación. En [78] se desarrolló un análisis económico y técnico para el uso de fuentes de energía geotérmica para plantas EME entre 75 y 90°C. Una de esas plantas está instalada en las Islas Cyclades (Grecia). Además, las fuentes de alta presión permiten usar directamente la potencia de los ejes para la desalación. Finalmente, la conversión de energía térmica en electricidad, permitirá la conexión con otros sistemas desalación [61].

### **6.6.7. Inconvenientes de la energía renovable**

Aunque las ventajas de este tipo de energías son notorias, también han causado diversidad en la opinión pública.

#### Fuentes renovables contaminantes

Todas las fuentes de energía producen algún grado de impacto ambiental. La energía geotérmica puede ser nociva si se arrastran metales pesados y gases de efecto invernadero a la superficie; la eólica produce impacto visual en el paisaje, ruido de baja frecuencia y pueden ser una trampa para las aves. Las grandes presas para producir energía hidráulica provocan pérdida de biodiversidad por detener la emigración de ciertos peces, generan metano por la materia vegetal no retirada, provocan pandemias como fiebre amarilla, dengue, equistosomiasis en particular en climas templados y climas cálidos, inundan zonas con patrimonio cultural o paisajístico, generan el movimiento de poblaciones completas y aumenta la salinidad de los cauces fluviales. La energía solar se encuentra en las menos agresivas salvo el debate generado por la electricidad fotovoltaica respecto a que se utiliza gran cantidad de energía para producir los paneles fotovoltaicos y tarda bastante tiempo en amortizarse esa cantidad de energía. La energía mareomotriz se ha discontinuado por los altísimos costos iniciales. La energía de las olas junto con la energía de las corrientes marinas habitualmente tienen bajo impacto ambiental ya que usualmente se ubican en costas agrestes. La energía de la biomasa produce contaminación durante la combustión por emisión de CO<sub>2</sub> que es reabsorbida por el crecimiento de las plantas

cultivadas pero que se ve formado de nuevo en las plantaciones que necesita para su desarrollo, disminuye también la cantidad de tierras cultivables disponibles para el ser humano y para la ganadería, con un peligro de aumento del costo de alimentos y aumentando la producción de monocultivos. Por otro lado, la biomasa no es realmente inagotable, aun siendo renovable. Existen dudas sobre la capacidad de la agricultura para proporcionar las cantidades de masa vegetal necesaria si esta fuente se populariza, lo que se está demostrando con el aumento de los precios de los cereales debido a su aprovechamiento para la producción de biocombustibles.

### Naturaleza difusa

Un problema inherente a las energías renovables es su naturaleza difusa, con la excepción de la energía geotérmica global la cual; sin embargo, sólo es accesible donde la corteza terrestre es fina, como las fuentes calientes y géiseres.

Puesto que ciertas fuentes de energía renovable proporcionan una energía de intensidad relativamente baja, distribuida sobre grandes superficies, son necesarios nuevos tipos de “centrales” para convertirlas en fuentes utilizables. Para 1000 kWh de electricidad, consumo anual per cápita en los países occidentales, el propietario de una vivienda ubicada en una zona nublada de Europa debe instalar ocho metros cuadrados de paneles fotovoltaicos (suponiendo un rendimiento energético medio de 12.5%) mientras que en partes más cálidas del mundo, con cuatro metros cuadrados de colector solar térmico, un hogar puede obtener gran parte de la energía necesaria para el agua caliente sanitaria con mucha menor inversión.

### Irregularidad

La producción de energía eléctrica permanente exige fuentes de alimentación fiables o medios de almacenamiento (sistemas hidráulicos de almacenamiento por bomba, baterías, futuras pilas de combustible de hidrógeno, etc.). Así pues, debido al elevado costo de almacenamiento de la energía, un pequeño sistema autónomo resulta raramente económico, excepto en situaciones aisladas, cuando la conexión a la red de energía implica costos más elevados.

## Diversidad geográfica

La diversidad geográfica de los recursos es también significativa. Algunos países y regiones disponen de recursos sensiblemente mejores que otros, en particular en el sector de la energía renovable. Algunos países disponen de recursos importantes cerca de los centros principales de viviendas donde la demanda de electricidad es importante. La utilización de tales recursos a gran escala necesita; sin embargo, inversiones considerables en las redes de transformación y distribución, así como en la propia producción.

## Integración del paisaje

Un inconveniente evidente de las energías renovables es su impacto visual en el ambiente local. Algunas personas odian la estética de los generadores eólicos y mencionan la conservación de la naturaleza cuando hablan de las grandes instalaciones solares eléctricas fuera de las ciudades; sin embargo, todo el mundo encuentra encanto en la vista de los “viejos molinos de viento” que, en su tiempo, eran una muestra visible de la técnica disponible.

## CAPÍTULO 7

### ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Como se observó en un principio, la problemática de los recursos hídricos y energéticos ha ido creciendo desde hace tiempo, con el aumento de la población en un 220% en los últimos 50 años (siendo que hace unos días llegamos a 7,000 millones de personas en el mundo cuando, antes de 1950 no rebasábamos los 3,000 millones) y junto a esto, la aparición de la Revolución Industrial que han provocado que la poca agua potable disponible (0.3% → 250 ppm) que existía para nuestro consumo se reduzca día con día y que los recursos para la generación de energía también se agoten además de que su uso provoque impactos indeseables en el ambiente.

Por ello, la necesidad de búsqueda y desarrollo de nuevas ideas y tecnologías sustentables, que permitan dar un seguimiento y solución a estos problemas, se encuentran a la orden del día, como parte de esas actividades, en este trabajo se presentó una revisión bibliográfica sobre la desalación de agua de mar en tres de sus principales tecnologías: evaporación instantánea de múltiple etapa (EIME), evaporación de múltiple efecto (EME) y ósmosis inversa (OI).

El tema de desalación es importante porque representa un proceso que se ha llevado a cabo desde tiempos remotos, con Aristóteles y su descripción del ciclo del agua, hasta la era moderna con el desarrollo y optimización de las tecnologías utilizadas, que permite obtener el recurso del agua potable a partir de un recurso que es “virtualmente inagotable”, agua de mar y/o aguas salobres pero esta ventaja tiene cierto precio, tanto económico como ambiental, siendo el último tópico, el tema central de esta investigación.

**Tabla 12. Resumen procesos desaladores**

Proceso	Ventajas	Desventajas
EIME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños requerimientos de energía mecánica</li> <li>• Indiferencia al aumento de TSD</li> <li>• Arreglo y operación más</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de gran cantidad de energía térmica</li> <li>• Uso de combustibles fósiles para generación de energía térmica y eléctrica</li> </ul>

	<p>complejo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología más madura</li> <li>• Uno de los más grandes complejos está en Arabia Saudita (750,000 m<sup>3</sup>/día)</li> <li>• Manejo de grandes cantidades de agua</li> <li>• Segundo lugar en uso comercial (27% aprox.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayores costos de instalación frente a EME</li> <li>• Mayores costos de operación frente a EME</li> <li>• Rechazo de salmuera con temperatura mayor que EME y OI y salinidad alta</li> <li>• Puede suceder bloqueo y corrosión de intercambiadores por uso coagulantes</li> <li>• Evitar uso de SHMP por hidrólisis e incrustación arriba de 45°C</li> <li>• Incrustación por hidróxido de magnesio</li> <li>• Necesidad de antiespumantes debido a la degradación de especies como fitoplancton a alta temperatura</li> <li>• Necesidad de postratamiento para ajuste de pH por uso de químicos</li> <li>• Inviabile económicamente en pequeñas producciones</li> </ul>
EME	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeños requerimientos de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de gran cantidad de energía térmica</li> </ul>

	<p>energía mecánica</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Indiferencia al aumento de TSD</li> <li>• Arreglo y operación más simple que EIME</li> <li>• Tecnología madura</li> <li>• Tercer lugar en uso (9% aprox).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de combustibles fósiles para generación de energía térmica y eléctrica</li> <li>• Menores costos de instalación frente a EIME</li> <li>• Rechazo de salmuera con temperatura y salinidad alta</li> <li>• Puede suceder bloqueo y corrosión de intercambiadores por uso coagulantes</li> <li>• Evitar uso de SHMP por hidrólisis e incrustación arriba de 45°C</li> <li>• Incrustación por hidróxido de magnesio</li> <li>• Necesidad e postratamiento para ajuste de pH por uso de químicos</li> <li>• Inviabile económicamente en pequeñas producciones</li> </ul>
<p style="text-align: center;">OI</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No hay necesidad de energía térmica</li> <li>• Rechazo de salmuera a temperatura ambiente aprox.</li> <li>• Arreglo y operación más</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de combustibles fósiles para producción de energía eléctrica</li> <li>• Menores costos de instalación respecto a procesos térmicos</li> </ul>

	<p>simple de las plantas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología más utilizada actualmente (59% Aprox.)</li> <li>• Incluye una de las plantas con mayor producción (300,000 m<sup>3</sup>/día, en Israel)</li> <li>• Mejora continua del proceso</li> <li>• Aumento constante de eficiencia y durabilidad de membranas</li> <li>• Puede tener un pretratamiento y postratamiento mejor definido porque no se forman nuevas especies ya que no hay aumento de temperatura</li> <li>• No se usan antiespumantes</li> <li>• Uso menor de combustibles fósiles respecto a plantas térmicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de gran cantidad de energía mecánica para alcanzar presiones de 70-75 bar</li> <li>• Reemplazo constante de membranas</li> <li>• Alto costo de mantenimiento</li> <li>• Rechazo de salmuera con salinidad mayor respecto a EME y EIME</li> <li>• Manejo de pequeñas cantidades de agua</li> <li>• Preferible para corrientes con concentraciones salinas menores</li> <li>• Mayores costos de operación</li> <li>• Podría existir daño en las membranas, por precipitación por el uso de coagulantes</li> <li>• Incrustación por carbonato de calcio</li> <li>• Necesidad de postratamiento para remoción de algunas especies iónicas como el boro y ajuste de pH</li> </ul>
--	---	---

De acuerdo a la Tabla 12 Podemos observar que las 3 tecnologías cuentan con ventajas y desventajas frente a la otra; sin embargo, considero que la tecnología EME comienza a ser

descartada comercialmente por lo que la selección queda abierta hacia los procesos EIME y OI y dependerá de las características del lugar de instalación, cargas térmicas disponibles para el proceso, cercanía a la red eléctrica, cercanía a fuentes de combustible, características del agua de alimentación, cantidad de población a suministrar; no obstante, la tendencia se inclina al proceso OI por el menor uso de energía, los costos menores y la mejora continua del proceso y las membranas.

Otro punto importante a considerar en los procesos de desalación para su operación exitosa y segura, es el tratamiento del agua de alimentación y en caso de ser necesario, del agua producto. En el caso del pretratamiento, los sistemas convencionales son las estrategias antiensuciamiento: coagulación, ajuste de acidez, antiincrustación, filtración, desinfección, antiespumantes, biocidas, anticorrosivos. Para el postratamiento tenemos el ajuste de pH, y la remoción de especies iónicas. A continuación, la Tabla 13, presenta las opciones de pretratamiento y el elemento en el que ayudan:

**Tabla 13. Opciones de pretratamiento [13]**

Pretratamiento	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	BaSO <sub>4</sub>	SrSO <sub>4</sub>	CaF <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Limo	Fe	Al	Bacterias	Agentes oxidantes	Materia Orgánica
Ajuste de acidez	++							+				
Inhibidores de incrustación	+	++	++	++	++	+						
Suavizar con IX	++	++	++	++	++							
Filtración media						+	+	+	+			
Coagulación-Floculación						+	++	+	+			++
Microfiltración / Ultrafiltración						++	++	+	+	+		++
Filtros de cartuchos						+	+	+	+	+		
Cloración										++		
Decloración											++	
Desinfección										++		

+ = Posible; ++ = muy efectivo

Independientemente del pretratamiento o postratamiento que reciba el agua, es importante que éstos sean los adecuados para que el agua tenga las características necesarias para el uso en el que se requiera.

En cuanto al abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada, es fundamental, para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras,

establecer límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas, químicas y radiactivas.

En el caso de México, dichos límites se encuentran descritos en la Norma Oficial Mexicana 127 de la Secretaría de Salud [NOM-127-SSA1-1994], y se definen en la Tabla 14.

**Tabla 14. Límites permisibles de características bacteriológicas**

Característica	Límites permisibles
Organismos coliformes totales	2 NMP/100 mL
	2 UFC/100 mL
Organismos coliformes fecales	NP/100 mL no detectable
	0 UFC/100 mL

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml [número más probable por 100 mL], si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml [unidades formadoras de colonias por 100 mL], si se utiliza la técnica de filtración por membrana. Las características físicas y organolépticas deberán ajustarse a lo establecido en la Tabla 15.

**Tabla 15. Propiedades organolépticas permisibles**

Característica	Límites Permisibles
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino-cobalto (UPC <sup>14</sup> ) [80].
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico).
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido en la Tabla 16. Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

<sup>14</sup> Es una medida del color que le confieren al agua los materiales contaminantes. Para su medición se utiliza la escala de Hazen.

**Tabla 16. Características químicas permisibles**

<b>Característica</b>	<b>Límites Permisibles</b>	<b>Característica</b>	<b>Límites Permisibles</b>
Aluminio	0.20	pH [unidades pH]	6.5 - 8.5
Arsénico	0.05	Plaguicidas [mg/L]	0.03
Bario	0.70	Clordano	0.30
Cadmio	0.005	DDT	1.00
Cianuros	0.07	$\gamma$ - HCH	2.00
Cloro residual libre	0.2 – 1.50	Hexaclorbenceno	0.01
Cloruros	250.00	Heptacloro y epóxido de hepta.	0.03
Cobre	2.00		
Cromo total	0.05	Metoxicloro	20.00
Carbonatos totales	500.00	2,4-D	50.00
Fenoles	0.0001	Plomo	0.025
Hierro	0.30	Sodio	200
Fluoruros	1.50	Sólidos disueltos	1000.00
Manganeso	0.15	Sulfatos	400.00
Mercurio	0.001	Sustancias Activas Az. Met. [SAAM]	0.50
Nitratos	10.00		
Nitritos	0.05	Trihalometanos	0.20
Nitrógeno amoniacal	0.50	Zinc	5.00

Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, lo cual incluye los suspendidos y los disueltos.

Los límites permisibles de características radiactivas se expresan en Bq/L [Becquerel por litro] y para radiactividad  $\alpha$  global es 0.1 y para radiactividad  $\beta$  global es 1.0

En un estudio se reportó que usando un polímero de ferrato de potasio como coagulante y preoxidante (para la destrucción de la pared celular de las bacterias), se incrementa la remoción de algas y microbios a más de 98%, ayuda a mejorar las MF, UF y filtración media y bajar a 0.5 UTN la turbidez y 0.2 mg/L la concentración de fierro, cumpliendo así con algunos de los límites establecidos atrás.

También es importante usar un ácido para reducir el pH y por consiguiente la incrustación por  $\text{CaCO}_3$ , pero entre ácido clorhídrico y sulfúrico, se prefiere el sulfúrico por su fácil manejo y disposición en la mayoría de los países, recordando que al finalizar el proceso, el pH del agua debe regresar al límite establecido entre 6.5 y 8.5, siendo siempre preferible el mayor acercamiento a 7.

Por otra parte, existen 3 tipos de antiincrustantes actualmente: organofosfonatos, SHMP (hexametáfosfato de sodio) y poliacrilatos. Pese a que cada uno trabaja de diferente manera, los organofosfonatos y los poliacrilatos son más efectivos y estables que el SHMP porque, éste último, se puede hidrolizar a temperaturas superiores a  $45^\circ\text{C}$ , posibilitando la incrustación por fosfato de calcio, por tal motivo, los organofosfonatos y poliacrilatos deben ser utilizados mayormente en plantas de desalación térmica y el SHMP para plantas OI.

Se observó que la filtración proporciona una mayor eficiencia de remoción de partículas suspendidas si la velocidad de filtración del medio es lo más alta posible; sin embargo, considero que esto podría traer consecuencias en el aumento de la caída de presión; no obstante, existe sistemas de filtración con fibra en Corea que permiten altas eficiencias obteniendo agua de alta calidad. Por otra parte, la MF y UF sirven además para remover compuestos orgánicos, tomando ventaja la UF dada su capacidad de remoción de partículas del orden de hasta 0.005 micrones.

Para los biocidas existen dos tipos de compuestos, los oxidantes y los no oxidantes, parte de los oxidantes es el cloro, que resulta ser el más efectivo en cuanto al pH puesto que no se necesita un tratamiento posterior; sin embargo, puede traer consigo otros dos problemas, la formación de trihalometanos (ambientalmente problemáticos) y la formación de nutrientes para el crecimiento de microorganismos, además de que puede provocar la oxidación de la membrana en el sistema OI, para evitar los problemas con el cloro, se utiliza bisulfito de sodio (SBS) por ser un reductor muy fuerte.

Otros biocidas oxidantes son derivados del cloro principalmente como isocianatos de cloro, hipoclorito pero menos eficaces y el dióxido de cloro menos perjudicial para la salud que el cloro pero con la desventaja de tener que ser generado in situ, también se encuentra el ozono que actúa de manera similar al cloro, destruyendo la membrana de la célula de las bacterias.

Como agentes no oxidantes tenemos la acroleína que tiene ventaja sobre los agentes oxidantes porque se puede desactivar fácilmente por bisulfito de sodio para evitar problemas ambientales pero es extremadamente inflamable y tóxica, por eso su uso limitado. Otros agentes son los fenoles tratados con cloro que no matan atacando la respiración celular sino evitan el crecimiento de los microorganismos, las sales de cobre, que se están evitando actualmente por su toxicidad para los humanos. Compuestos órgano sulfúricos evitan el crecimiento de la célula por inhibición de transferencia de energía, finalmente tenemos a las sales cuaternarias de amonio que pueden causar ensuciamiento.

También se deben usar antiespumantes para, como su nombre lo dice, evitar la formación de espuma que pudiese dificultar el funcionamiento de los equipos, un ejemplo de ellos son los poliglicoles.

Para controlar la corrosión, la mejor opción, actualmente es el uso de pinturas, lacas o barnices, así como materiales orgánicos poliméricos que suministran protección eficaz y duradera pero deben elegirse adecuadamente para cada proceso por la posibilidad de su disolución en la corriente de proceso.

Como postratamiento, se usan generalmente el ajuste de pH para que el agua sea lo más cercana al valor neutro, también la decoloración que se mencionó anteriormente para evitar problemas ambientales y de crecimiento de microorganismos, también se encuentra la sanitización ultravioleta u ozonización como métodos más detallados, el ajuste de boro es un derivado del ajuste de pH puesto que existe en valores menores a 8 con la disociación del HBrO y también se encuentran las resinas de intercambio iónico y la electrodiálisis inversa.

Con la información anterior, es importante mencionar, que el pretratamiento y postratamiento deben ajustarse a las características del sistema y del producto deseado puesto que a veces, pese a tener buenos elementos de remoción de ensuciamiento, quizá no sean necesarios y los más eficientes estén muy sobrados o los menos eficientes no sirvan de nada para obtener un producto de buena calidad.

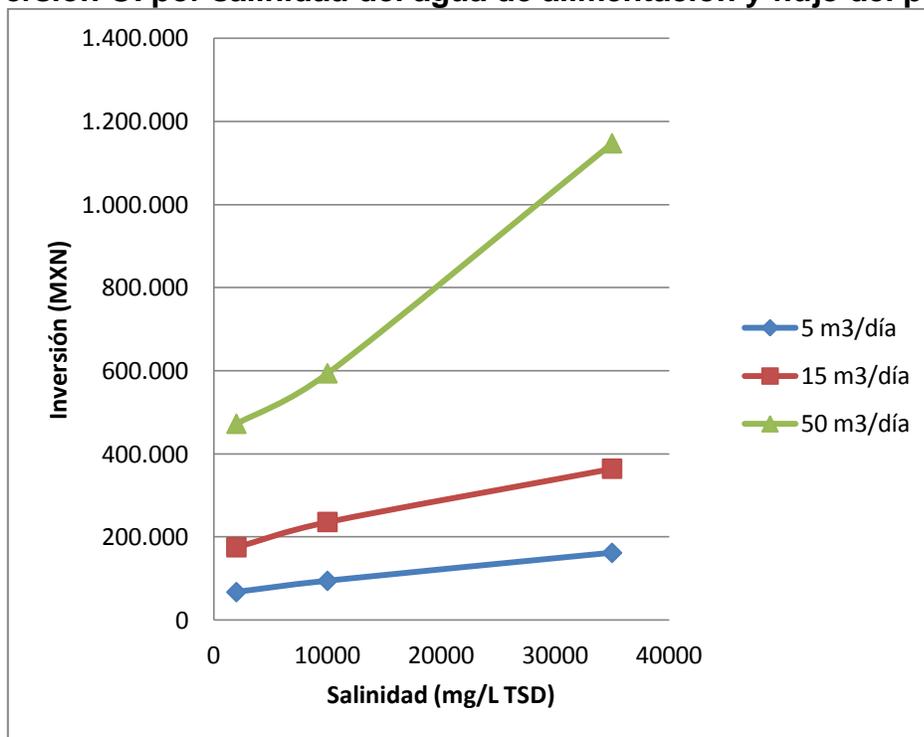
Lo mejor sería asegurar la alimentación al tener el agua en almacenamiento previo al proceso, donde se aseguren sus características idóneas para evitar problemas de ensuciamiento; sin

embargo, a falta de esta solución, no queda más que diseñar, operar y monitorear de manera adecuada los tratamientos requeridos para evitar daños en el proceso y aún más importante, daños al medio ambiente por el exceso de químicos de tratamiento cuya remoción pudiese representar un problema de enormes magnitudes.

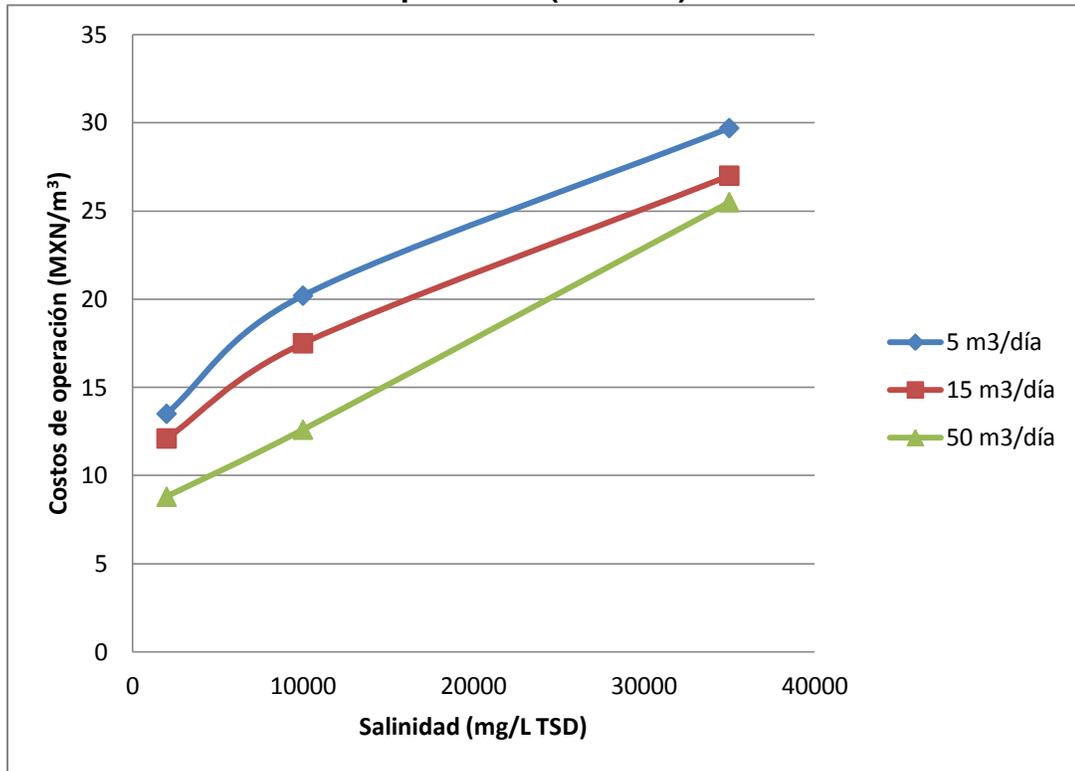
Finalmente, se debe respetar la normatividad establecida por cada país para el uso del agua en distintas actividades y para tener un producto de alta calidad.

Gracias a las tablas presentadas en el capítulo 3 es posible realizar una comparación tanto de la inversión como de los costos de operación entre los 3 procesos desaladores que han sido tratados a lo largo de este trabajo. Para facilitar el análisis se presentan las Gráficas 1, 2, 3 y 4 para una mejor visualización de la tendencia de los costos.

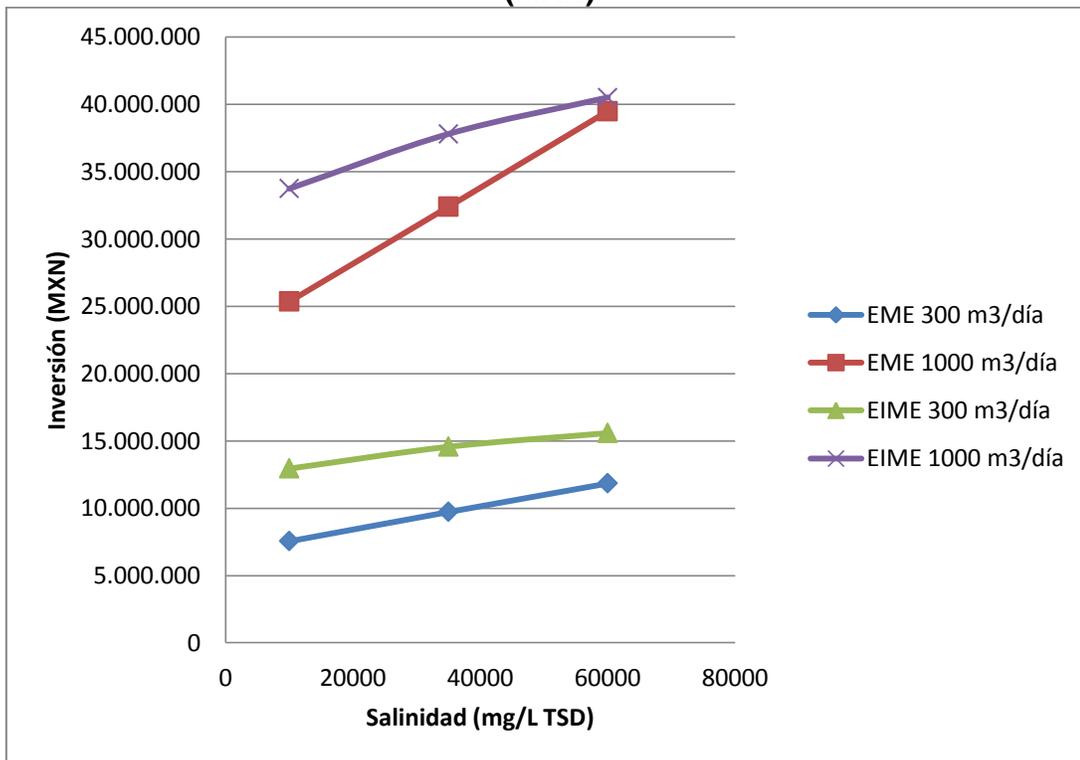
**Gráfica 1. Inversión OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN)**



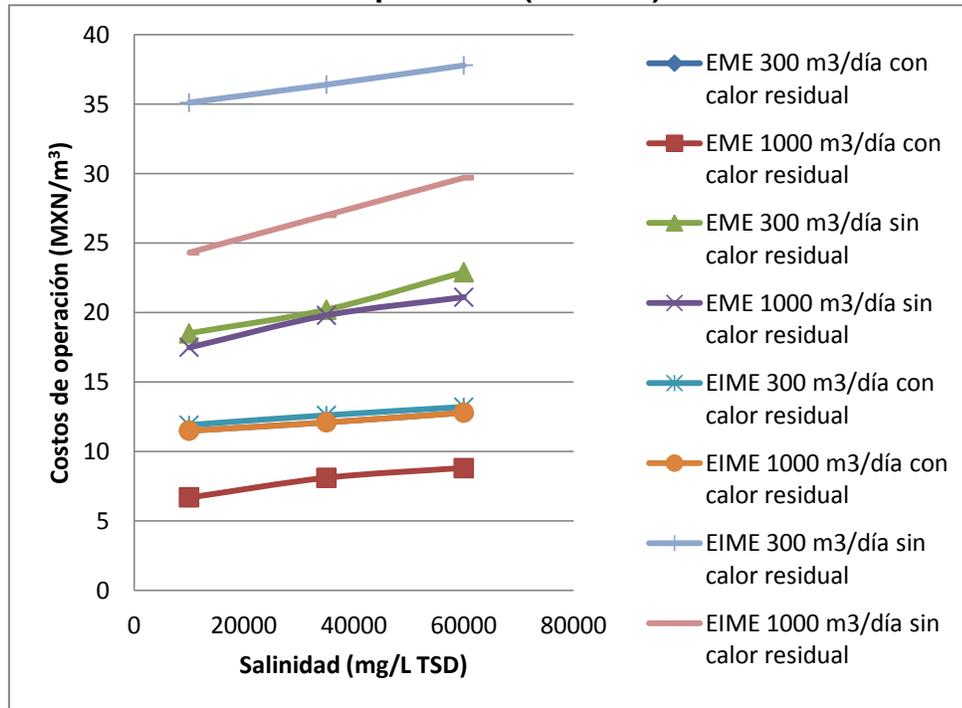
**Gráfica 2. Costos de operación OI por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m<sup>3</sup>)**



**Gráfica 3. Inversión EME y EIME por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN)**



**Gráfica 4. Costos de operación EME y EIME por salinidad del agua de alimentación y flujo del producto (MXN/m<sup>3</sup>)**



De la literatura, es posible apuntar, en términos generales, que los costos para las plantas OI son menores que para los procesos térmicos, y esta tendencia es aún más marcada a bajas capacidades de producción donde los procesos térmicos no son viables.

Tomando como premisa el párrafo anterior, se puede hacer un análisis de la variación de costos en cuanto al flujo que se maneja de producto y la salinidad del agua de alimentación para cada proceso, suponiendo que todas las demás variables (fuente de energía, fuente de agua de alimentación, disponibilidad de tierra, disposición de la salmuera de rechazo, y los factores de gestión ambiental) no afectan en el proceso.

Observamos que la inversión y los costos de operación, para todos los sistemas aumenta con el aumento de salinidad, dado que para las plantas OI se incrementan los requerimientos de bombeo, mientras que para las plantas térmicas son necesarios mejores requerimientos anticorrosión; sin embargo, la diferencia es menos marcada en los procesos térmicos.

También se puede mencionar que las inversiones de ambos tipos de procesos aumentan con el flujo, debido al tamaño de las instalaciones requeridas para manejar dichos flujos y la inversión

para el proceso EIME es mayor que para EME debido a que es mayor el costo por instalar el primer complejo que el segundo.

En cuanto a los costos de operación, se aprecia que los costos de las plantas térmicas son mayores que para los sistemas OI debido al uso de mayor cantidad de energía, en específico de combustibles fósiles para la producción de energía térmica.

Los costos de operación aumentan con la salinidad de manera sustancial para el proceso OI por los requerimientos de más potencia de bombeo para separar dichas sales mientras que para los procesos térmicos permanecen casi constantes debido a la naturaleza de los mismos.

En cuanto al aumento de la capacidad, los costos de operación para ambos tipos de procesos disminuyen, a modo de condonación, debido a que, al tener una mayor capacidad de producción, se logra el abastecimiento de una mayor cantidad de población.

Los costos de operación también disminuyen con el uso de calor residual de otras fuentes, porque la utilización de combustibles fósiles para la generación de energía térmica ya no es realizada.

Cabe mencionar que estos datos son únicamente para mostrar la tendencia que se sigue para cada planta y no se deben tomar en cuenta de manera estricta porque para ellos es necesario considerar todos los factores establecidos a lo largo del capítulo 3 y adaptarlos al lugar donde se requiera instalar una planta.

Es importante recalcar que el acoplamiento de energías renovables y ciclos de vapor podría permitir una disminución en los costos de operación debido al autoabastecimiento de energía de los procesos o la ayuda a los suministros actuales porque actualmente los costos de las plantas desaladoras están en un rango ligeramente alto que propicia la falta de uso de las tecnologías.

## **7.1. Impactos ambientales**

Ya que los impactos ambientales de los procesos de desalación están intrínsecamente relacionados a la eficiencia del sistema, las cargas producidas por unidad de agua han disminuido

en las décadas pasadas debido al incremento de la eficiencia de los procesos; sin embargo, hay algunos remanentes que deben mitigarse, como es el caso de la mayoría de los procesos, el impacto sonoro y visual se encuentran dentro de la lista, también los impactos dados por la etapa de construcción de las plantas; sin embargo, los impactos de mayor magnitud que son específicos para la desalación son el abastecimiento de agua de alimentación, la descarga de la salmuera concentrada hacia cuerpos de agua y las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera porque estarán presentes a lo largo de toda la vida útil del proyecto.

En cuanto al agua de alimentación se produce una perturbación en las condiciones del ambiente marino, porque son los lugares más comunes de alimentación a las desaladoras, provocando entre otras cosas, resuspensión de sedimentos, nutrientes o contaminantes del lugar y trayendo complicaciones al transporte e intercambio de los mismos con otros ambientes. Otro aspecto importante de la toma de alimentación se produce con los seres vivos que podrían ser afectados por arrastre con las corrientes hacia la planta o impacto con las rejillas provocando una descompensación en la fauna marina y a su vez fallas en la cadena alimenticia.

Para la corriente de rechazo o salmuera se halla el problema de la alta temperatura y la alta salinidad, además de residuos de químicos de pretratamiento, estos tres problemas podrían ser fatales para la vida marina, para los procesos térmicos el volumen de agua rechazada es de 8 a 10 veces el volumen de agua desalada, mientras que para el proceso OI es de 2 a 3 veces; sin embargo, su contenido en sales es mucho mayor por lo que el ambiente marino se ve afectado desde la superficie hasta el fondo por las diferentes densidades en ambos procesos. En el primer caso la corriente flota prácticamente por la combinación con el agua de enfriamiento de los sistemas térmicos y en el segundo, el agua se va al fondo por el exceso de sales.

En el caso de organismos menos complejos, se ha visto el intercambio de una especie por otra que resiste las condiciones marinas establecidas por la corriente de rechazo mientras que para organismos más grandes, como los peces, no se han visto grandes afectaciones mas sí, pequeñas heridas en la piel y algunos órganos internos; no obstante, no ha habido estudios concluyentes para el daño en la fauna móvil.

Como se vio anteriormente, el daño por algunas especies químicas del pretratamiento puede presentarse, en el caso del cloro, se habló de la formación de trihalometanos que poseen

propiedades carcinogénicas para los animales. Para los metales pesados, como el cobre, podría darse la corrosión que se arrastraría en la corriente de rechazo formando sedimentos en el mar que serían asimilados por algunos organismos que formen parte de la cadena alimenticia. Los antiincrustantes son de tiempos de degradación largos, por lo que su presencia en el mar derivaría en intromisiones en algunos procesos naturales; sin embargo, su efecto no está bien definido. Los coagulantes presentan el efecto de la “salmuera roja” debido al uso de sales férricas, si esto ocurre, la turbidez en el agua se incrementa y se reduce la penetración de luz, afectando algunos procesos de las especies marinas. Los antiespumantes son de lenta degradación y su permanencia en el ambiente marino podría afectar el equilibrio.

Por su parte, la principal afectación por el uso de la energía térmica o mecánica es la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) derivada de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón), aunque cada metro cúbico de producto utilice poca energía, la energía total es muy grande y los efectos dañinos son proporcionales [32].

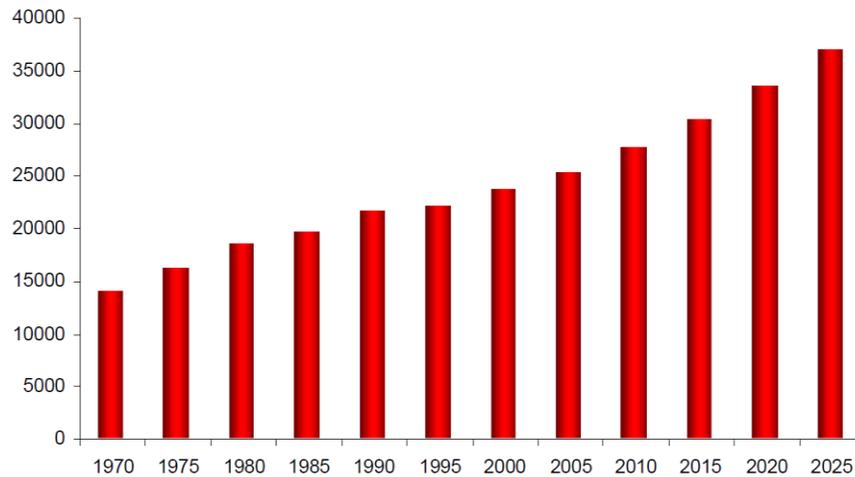
Los principales gases que se producen y sus cargas promedio se presentan a continuación en la Tabla 17:

**Tabla 17. Gases de efecto invernadero y cargas emitidas**

	<b>OI</b>	<b>EME</b>	<b>EIME</b>
<b>CO<sub>2</sub> (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2	20	20
<b>NO<sub>x</sub> (g/m<sup>3</sup>)</b>	4	25	25
<b>SO<sub>x</sub> (g/m<sup>3</sup>)</b>	12	27	27
<b>COVDM (g/m<sup>3</sup>)</b>	1.5	7	7

Con se vio en el capítulo anterior, la capacidad mundial de agua desalada es de  $23 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/h aproximadamente, que no es ni el 1% de la huella hídrica promedio mundial anual ( $24,500 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/día [81]), por lo que haciendo uso de los promedios de la Tabla 18 podemos obtener la cantidad de emisiones de cada tipo de gas que provoca esa capacidad mundial, tomando en cuenta que la capacidad instalada para cada proceso aquí tratado es aproximadamente 59% para OI, 27% EIME, 9% EME y 5% otras tecnologías [73]. También se obtiene el total de emisiones generadas por los 3 procesos desaladores principales para un tipo de gas y el porcentaje que corresponde de las emisiones de la desalación respecto a las emisiones totales mundiales.

Como referencia, Figura 14, se toman las emisiones mundiales anuales del CO<sub>2</sub> desde 1970 y extrapoladas al año 2025 [64], mientras que para los demás gases, a falta de información a nivel mundial, se toman como referencia los valores reportados para las emisiones de México del período 1990-2002, Figura 15, para tener un porcentaje promedio de cada tipo de gas (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y COVDM) respecto al CO<sub>2</sub> en nuestro país y para aplicarlo al dato mundial de la emisión de CO<sub>2</sub> para estimar el valor correspondiente a los demás gases.



**Figura 14. Emisiones de CO<sub>2</sub> por producción y uso de energía, 1970-2025 (millones de toneladas) [66]**

GEI	1990	1992	1994	1996	1998	2000	2002
CO <sub>2</sub>	31,142.88	32,168.76	38,001.77	39,519.71	44,016.44	50,442.14	47,069.14
COVDM	406.92	447.12	566.96	383.80	407.61	611.94	525.27
SO <sub>x</sub>	92.05	81.74	71.56	87.02	99.32	104.28	102.70
CO	67.23	43.84	32.24	67.36	63.57	56.55	42.13
CH <sub>4</sub>	5.13	4.68	4.40	4.79	4.70	4.61	3.62
NO <sub>x</sub>	5.10	3.93	2.81	10.24	8.49	5.50	4.17
N <sub>2</sub> O	1.62	1.00	0.14	3.26	2.29	0.82	0.36

**Figura 15. Emisiones de GEI por gas para período 1990-2002 [83]**

**Tabla 18. Gases de efecto invernadero y cargas totales mundiales**

	<b>OI</b>	<b>EME</b>	<b>EIME</b>	<b>Emisión total mundial por desalación</b>	<b>Emisión total mundial</b>	<b>(% mundial)</b>
<b>CO<sub>2</sub> (ton/año)</b>	9,906,100	15,111,000	45,333,000	70,350,100	35,000,000,000	0.201
<b>NO<sub>x</sub> (ton/año)</b>	19,812	18,889	56,666	95,367	420,739,054	0.023
<b>SO<sub>x</sub> (ton/año)</b>	59,437	20,400	61,200	141,036	80,436,806	0.175
<b>COVDM (ton/año)</b>	7,430	5,289	15,867	28,585	5,047,480	0.566

Como se puede observar en la Tabla 18, las emisiones del proceso OI son menores en magnitud a las de los procesos térmicos; pero no menores en importancia y al igual que el consumo de energía, al tener grandes producciones de agua potable, las emisiones se vuelven muy significativas y potencialmente peligrosas pero siguen representando un porcentaje muy pequeño en relación a las emisiones generadas mundialmente.

También se pudo notar que algunos efectos colaterales por los gases emitidos repercuten en los humanos:

En principio, el CO<sub>2</sub> sólo provoca un círculo vicioso en el que el aumento de temperatura del planeta hace el CO<sub>2</sub> disuelto en los océanos se libere y se siga acumulando y agravando el problema, además de que se derritan algunas placas de hielo del planeta.

Los NO<sub>x</sub> provocan efectos nocivos en el sistema respiratorio pudiendo llegar a complicarse hasta cáncer de pulmón, bronquitis y pulmonía, también producen irritación en ojos, nariz y boca. Así como también ayudan a la formación del smog fotoquímico. Los SO<sub>x</sub> tienen un comportamiento similar para el daño en la salud humana y otro daño ambiental es la formación de la lluvia ácida, produciendo daños en la salud, de nuevo, y otros impactos como corrosión de materiales. Los

COVDM también pueden llegar a daños graves como cáncer y ambientalmente son precursores del ozono que contribuye a la formación de smog fotoquímico [54].

Aunque aún es escasa la normatividad existente en el mundo directamente relacionada con la mitigación de las emisiones GEI, existen algunos esfuerzos de legislación importantes en Europa y Japón para construir un marco jurídico local ante el cambio climático.

En este sentido destacan normas emitidas por la Agencia Europea de Protección Ambiental para la reducción de algunas emisiones de gases de efecto invernadero, también se encuentra el protocolo de Kyoto, para la reducción de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>).

En México, para el campo de las fuentes fijas destacan: NOM-085-ECOL-1994 que establece niveles permisibles de emisiones a la atmósfera de diversos gases y de material particulado, dependiendo de la región donde se generen, NOM-086-ECOL-1994 que establece las características de los combustibles derivados del petróleo para satisfacer las exigencias ambientales [84].

Dada la falta de normatividad y el aporte tan pequeño que provocan las desaladoras, parecería posible pasar por alto los impactos ambientales inherentes al uso de la energía; sin embargo, no debe ser así y deben realizarse acciones en pro del establecimiento de los límites para cada industria y de las medidas de prevención, mitigación y compensación adecuadas.

## **7.2. Medidas de solución a los impactos ambientales**

Afortunadamente, ahora la tendencia en los procesos se está dirigiendo a la parte de la protección del medio ambiente, en el caso de los GEI, se encuentra el desarrollo de las energías renovables que ha venido sucediendo desde hace algunos años y que son una gran mejora por el uso de fuentes “virtualmente” inagotables y por la coincidencia espacial y temporal del déficit de agua dulce y la abundancia de recursos renovables que sugiere la idoneidad de la desalación mediante este tipo de energías que ofrecen ventajas socioeconómicas, políticas, medioambientales y tecnológicas.

Se presentan a continuación, en la Tabla 21, un resumen de las medidas, de prevención, mitigación y/o compensación, presentadas en el capítulo 6 para los principales problemas ambientales de las plantas desaladoras.

**Tabla 19. Problemática y medidas de mitigación**

Problema	Medidas de mitigación
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso de pantallas enmalladas de distintos tamaños y formas para la detención de los organismos acuáticos.</li> <li>• Minimización de la velocidad de la corriente de alimentación.</li> <li>• Colocación de tomas en lugares estratégicos donde la concentración de especies marinas sea mínima.</li> </ul>
Salmuera de rechazo (temperatura, salinidad, químicos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Predilución de la corriente de rechazo con corrientes de enfriamiento de plantas de energía para disminuir la temperatura.</li> <li>• Colocación de difusores a la descarga para mejor dispersión de la corriente</li> <li>• Disipación del calor de la salmuera antes del rechazo mediante el trayecto de tubería.</li> <li>• Tratamiento de sustitución de sustancias químicas antes del rechazo</li> <li>• Estaciones especiales de tratamiento antes de la descarga.</li> <li>• Uso de métodos alternativos de pretratamiento, v. gr. como MF o UF.</li> <li>• Obtención de sal, materia prima la sal de mesa mediante el proceso de cristalización.</li> </ul>

Emisiones de GEI	Utilización de centrales de energía eléctrica de origen renovable para reducir las emisiones: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eólicas</li> <li>• Biomasa</li> <li>• Solares</li> <li>• Hidroeléctricas</li> <li>• Geotérmicas</li> </ul>
------------------	---

En la desalación se ha revisado el uso de las fuentes de energía de origen renovable y se ha visto que son pocas y tiene capacidad limitada, también se observó que, actualmente, es difícil que uno de los sistemas anteriores pueda proveer de energía, en su totalidad, a una planta desaladora por las grandes cantidades requeridas y la intermitencia o baja producción de la que constan. También se observó que pese a ser energías renovables, no todas son limpias como la biomasa y que las energías limpias siguen teniendo impactos ambientales; sin embargo, para pequeñas producciones (1-6000 m<sup>3</sup>/día aprox.) es posible utilizar los sistemas de energía renovable y en mayores producciones el acoplamiento de los sistemas renovables con los sistemas comunes coadyuva a la reducción de costos y de los impactos ambientales.

Un análisis comparativo sobre las energías renovables se presenta en la Tabla 20: Cabe señalar que la energía undimotriz y la de las olas no se tomaron en cuenta debido a que ofrecen menos posibilidades de uso.

**Tabla 20. Análisis comparativo de las diferentes energías renovables [85]**

Características	Eólica	Geotérmica	Hidráulica	Solar	Biomasa
Ventajas	1.Gratis. 2.Inagotable 3.Limpia. 4. Segunda más usada en la desalación. 5.Existencia de parque eólicos	1.Supone un ahorro de las energías fósiles donde se pueda usar. 2.Inagotable. 3.Impacto ambiental	1.Suministra energía cuando hace falta. 2.Inagotable. 3.Limpia	1.Gratis (sólo cuesta la inversión en instalación). 2.Inagotable. 3.Limpia. 4.Tiene una elevada calidad	1.Variada gama de materiales para la producción de energía. 2.Uso del CO <sub>2</sub> en el

	<p>marinos.</p> <p>6:Mejora del suministro con acoplamiento solar.</p>	<p>menor que el de las energías fósiles.</p> <p>4.Posibilidad de generación de energía térmica o eléctrica.</p>		<p>energética.</p> <p>5. Primera más usada en la desalación.</p> <p>6.Diversidad de equipos, celdas fotovoltaicas, celdas fototérmicas o estanques solares.</p> <p>7.Acoplamiento con energía eólica mejora el suministro.</p> <p>8.Se pueden lograr sistemas de cogeneración.</p>	<p>crecimiento de los cultivos.</p> <p>3.Desarrollo de cultivos energéticos.</p>
Inconvenientes	<p>1.Dispersión (no está concentrada en una zona).</p> <p>2.Intermitente (cuando las condiciones climatológicas los permiten).</p> <p>3.Difícil de almacenar.</p> <p>4.Necesita equipos grandes</p>	<p>1.Es de aplicación local (sólo donde es posible).</p> <p>2.No puede transmitirse a grandes distancias (el agua caliente se enfría y el vapor se condensa).</p> <p>3.La elevada humedad</p>	<p>1.Es cara, ya que además de las grandes inversiones, para construir la central hidráulica, como los emplazamientos están lejos de las grandes poblaciones,</p>	<p>1.Llega a la tierra de manera dispersa e intermitente (depende de factores como el estado atmosférico y la contaminación).</p> <p>2.Para la energía eléctrica es necesario</p>	<p>1.Eficiencia del 20- 30%.</p> <p>2.Falta de constancia en suministro de materia prima.</p> <p>3.Falta de disponibilidad de biomasa.</p>

	(caras). 5. Eficiencia del 45%.	origina una fuerte corrosión en las instalaciones. 4.Falta aplicación en la desalación. 5.Pocos antecedentes de uso.	es necesario transportar la energía, a través de costosas redes. 3.Suministra 20% de la energía eléctrica mundial. 4.El cambio de fase en la materia prima no es necesario.	realizar una transformación energética. 5.Eficiencias del 10 al 30%. 6.Celdas fotovoltaicas costosas.	
Impacto ambiental	1.Ruido del giro del rotor. 2.Impacto visual, poco estético. 3.Produce interferencias en las transmisiones de TV y radio.	1.Requiere grandes extensiones de terreno. 2.Provoca erosión en el suelo, hundimiento del terreno e inducción a la actividad sísmica. 3.Ruido 4.Arrastre de GEI. 5.Modificación de las fuentes	1.Cambios en el ecosistema. 2.Pérdida de suelos, debido a la erosión. 3.Variación del caudal, río abajo. 4. Afectación en la biodiversidad. 5.Puede llegar a provocar la movilidad de poblaciones	1.Requieren grandes extensiones de terreno. 2.Impacto visual por las instalaciones. 3.Uso de gran cantidad de energía para producción de paneles fotovoltaicos.	1. La combustión de la biomasa produce CO <sub>2</sub> , en menor cantidad que los combustibles fósiles. 2. Disminución de la cantidad de tierras cultivables para el ser

		de agua. 6.Alteración visual del paisaje.	enteras por inundaciones.		humano y ganadería. 3.Generación de monocultivos.
--	--	--	------------------------------	--	---

Como se puede observar, en la Tabla 20, cada fuente de energía tiene algunas ventajas y desventajas frente a la otra; sin embargo, es posible utilizarlas todas para la generación de energía que sea aprovechable en la desalación; no obstante, este tipo de energías también producen impactos ambientales que hay que tomar en cuenta antes de tomar una decisión sobre su aplicación a los procesos desaladores.

Por ello, se considera que las energías renovables más adecuadas para su aplicación a la desalación por su actual grado de desarrollo tecnológico y sus costos, son la energía eólica y solar además de que su impacto ambiental se inclina principalmente a lo visual y paisajístico. En la producción de electricidad, la energía eólica es la tecnología más madura. Su acoplamiento a la ósmosis inversa está muy cerca de ser comercial siendo una opción muy prometedora mientras que la energía solar térmica puede combinarse tanto con procesos de destilación como con procesos de membrana al tener sistemas de generación de energía térmica, eléctrica o de cogeneración [85].

En dichos sistemas se encuentran los parques eólicos, los estanques solares, las celdas fotovoltaicas y los espejos parabólicos, cuyas características permiten generar energía térmica, eléctrica o ambas mediante sistemas de cogeneración, que podrían abastecer uno o más tecnologías de desalación simultáneamente.

Por otra parte, el acoplamiento de los sistemas eólico-solar incrementaría la eficiencia debido a que sus intermitencias pueden ser complementarias, son las tecnologías mayormente aplicadas en la desalación actualmente y generan problemas ambientales no tan graves además de que su operación no es difícil y se desarrollan cada día nuevos avances que permiten la disminución de sus costos, por ejemplo, la disminución del número de hojas de las turbinas del sistema eólico y la disminución del espesor y el desarrollo de celdas monocristalinas que no son tan costosas para la

producción de energía eléctrica, no obstante, es necesario realizar el estudio para la selección del sistema más adecuado a cada planta, tomando en cuenta los siguientes puntos [86]:

- Considerar sólo acoplamientos que tengan sentido termodinámico, como ejemplo, no emplear energía eléctrica para generar energía térmica.
- Se deberá valorar la eficiencia del proceso.
- Tomar en cuenta las características de una localización determinada, como demanda de agua dulce, terreno disponible, accesibilidad, grado de desarrollo, etc.
- Sencillez de operación. Los sistemas más adecuados son los que puedan operar desatendidos o con controles simples, con procedimientos de operación, paro y arranque de fácil comprensión.
- Buen comportamiento ante fallos. Es importante que fallas en el sistema no provoquen el paro total del mismo.
- Fallas posibles de fácil diagnóstico.
- Idoneidad. Cada emplazamiento impone características debidas al clima, accesibilidad y evolución futura de la demanda.
- Madurez de la tecnología. Tecnologías bien probadas y desarrolladas.
- Garantía del suministro de agua potable.
- Impacto ambiental mínimo a la zona aplicable.
- La viabilidad económica de distintos sistemas que sean razonables, a la vista de las consideraciones anteriores y del menor impacto ambiental, marcará el dispositivo más adecuado.

Finalmente, habrá que propiciar el desarrollo de nuevos sistemas de energía renovable y la optimización de los existentes para estar preparados a futuro y que sean competitivos con los combustibles fósiles.

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Con base en la investigación realizada, se concluye lo siguiente:

- Se cumplió con el objetivo de determinar, teóricamente, los impactos ambientales dados por la energía utilizada en los principales procesos de desalación de agua y proponer posibles medidas de prevención y/o mitigación de dichos impactos.
- Las emisiones de GEI reportadas en el capítulo 5 representan un porcentaje muy pequeño (menos del 1%) de las emisiones mundiales generadas por todas las actividades humanas, sin embargo, no se debe menospreciar la disminución de su generación.
- Ante la situación anterior, se sugirió el uso de fuentes de energía renovable para la disminución de los gases de efecto invernadero originados en la combustión de combustibles fósiles para la generación de energía que sirve para impulsar los procesos de desalación de agua.
- Entre las mejores opciones, se propuso, teóricamente, a la energía eólica y la energía solar fotovoltaica o térmica, debido a su desarrollo actual, su mayor disponibilidad en distintas zonas geográficas, la gran cantidad de aplicaciones reportadas en la desalación y por la optimización que los procesos van teniendo, logrando eficiencias mayores en la producción de energía y la disminución de costos con el desarrollo de nuevos materiales y/o equipos, además del acoplamiento entre estos sistemas que podrían permitir un mejor suministro energético.
- Pese a lo anterior, actualmente, no podemos pensar en las energías renovables como una solución definitiva y aceptable para la mitigación del problema puesto que siguen presentando inconvenientes que limitan su uso generalizado. Entre esos inconvenientes se encuentran, la inversión alta que se requiere para la instalación de los sistemas, los costos de operación adicionales, la necesidad de grandes áreas para su instalación y finalmente el

suministro intermitente e insuficiente de energía que hace necesario el uso de sistemas de almacenamiento y el uso de energía (todavía) proveniente de combustibles fósiles.

- Desafortunadamente la variabilidad de las condiciones de los procesos de desalación y de las zonas geográficas, no permiten establecer una solución que funcione para todas las situaciones que se presenten, pero este estudio pretendió dar un enfoque global del entorno y un punto de referencia para comenzar un análisis detallado adaptable al sistema que se pretenda utilizar.

Por tal motivo, se recomienda lo siguiente:

- El seguimiento de esta línea de investigación en estudios posteriores.
- La determinación de los impactos ambientales específicos para un sistema existente mediante una evaluación de impacto ambiental.
- El estudio de la posibilidad de aplicación de las fuentes de energía renovables mediante el análisis de las condiciones del lugar en cuanto a disponibilidad de terreno, condiciones climatológicas y temporales, para la determinación del suministro que se podría lograr mediante la instalación de los sistemas eólico y/o solar.
- La determinación de mejora de las condiciones actuales, tanto económicas, políticas, ambientales y sociales del sistema, donde se pretenda utilizar.
- El análisis de la viabilidad económica de los sistemas renovables.
- La aplicación del estudio de manera local, es decir, en una planta de México, lo que podría propiciar el uso de más sistemas de energía renovable, no sólo en la desalación, sino en toda la industria del País, lo que nos llevará a lograr un desarrollo sustentable.

## REFERENCIAS

1. Muñoz, F., Barrera, E. y J. Jacob, [1997], *Ubicación de los sitios adecuados en México para la instalación de plantas desaladoras usando energía solar*, Memorias de la XXI Semana Nacional de Energía Solar, Zacatecas, 1° al 5 de octubre.
2. <http://www.eluniversal.com.mx/editoriales/45487.html> [Consultada el sábado 1° de mayo de 2010, a las 12:00 horas].
3. <http://www.search.eb.com.pbidi.unam.mx:8080/eb/article-9030038> [Consultada el lunes 4 de mayo de 2010, a las 16:30 horas].
4. Wirtgen, J., [2009], *Recursos hídricos: Resumen del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*, GreenFacts, Bélgica, 6 pp.
5. Naciones Unidas, [2011], *Estudio económico y social, 2011: La gran transformación basada en tecnologías ecológicas*, Nueva York, 35 pp.
6. Muñoz, F. y R. Guzmán, [2006], *Evaluación del uso de la energía solar en la desalación de agua de mar a gran escala*, Memoria Semana Nacional de Energía Solar, 291-295 pp.
7. El-Dessouky, H., Alatiqi, I. y H. Ettouney., [1998], *Process synthesis: the multi-stage flash desalination system*, *Desalination*, **115**: 156-157 pp
8. Ecoagua Ingenieros, [2009], *Desalación Mediante Ósmosis Inversa*, Artículos Técnicos, 6 pp.
9. Delgado-Torres, A., García-Rodríguez, L. y V. Romero-Ternero, [2007], *Preliminary design of a solar thermal-powered seawater reverse osmosis system*, *Desalination*, **216**: 292-305 pp.
10. Peters, T. y P. Domènec, [2008], *Seawater intake and pre-treatment / brine discharge – environmental issues*, *Desalination*, **221**: 576-584 pp.
11. Prihasto, N., Liu, Q. y S. Kim, [2009], *Pre-treatment strategies of seawater desalination by reverse osmosis system*, *Desalination*, **249**: 308-316 pp.
12. Ma, W., Zhao, Y. y L. Wang, [2007], *The pretreatment with enhanced coagulation and UF membrane for seawater desalination with reverse osmosis*, *Desalination* **203**: 256 – 259 pp.
13. Redondo, J.A. y I. Lomax. [1997], *Experiences with the pretreatment of raw water with high fouling potential for reverse osmosis plant using FILMTEC\*\* membranes*, *Desalination*, **110**: 167-182 pp.
14. Lee, J., Johir, M., Chinu, K., Shon, H., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., Kim, C. y K. Shaw, [2010], *Novel pre-treatment method for seawater reverse osmosis: Fibre media filtration*, *Desalination*, **250**: 557-561 pp.

15. <http://www.lenntech.es/biocidas.htm#ixzz0UltGSkYV> (consultada el 20 de octubre de 2009)
16. Causa, E. y C. Pinto, [1974], *Investigación sobre procesos de coagulación. Floculación de aguas en plantas de tratamiento*, Santiago, Chile.
17. Bick, A. y G. Oron, [2005], *Post-treatment design of seawater reverse osmosis plants: boron removal technology selection for potable water production and environmental control*, *Desalination*, **178**: 233-246 pp.
18. Correa, F., [2007], *El impacto social y económico de la desalación de agua de mar*, Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM, 103-123 pp
19. Anónimo, [2002], *Economic and technical assessment of desalination technologies in Australia: with particular reference to national action plan priority regions*, Agriculture, Fisheries & Forestry. 1-80 pp.
20. [www.xe.com/ucc/convert/?language=es&Amount=1&From=EUR&To=AUD](http://www.xe.com/ucc/convert/?language=es&Amount=1&From=EUR&To=AUD) (consultada el 18 de septiembre de 2011)
21. Valero, A., Uche, J. y L. Serra, [2001], *La desalación como alternativa al PHN*. Universidad de Zaragoza, 56-68 pp.
22. Lattemann, S. y T. Höpner, [2008], *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination*, *Desalination*, **220**: 1-15 pp.
23. Oyarzún, J., [2008], *Evaluación de impactos ambientales, Temas ambientales*, Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de La Serena, Chile, 114 pp.
24. Corporativo ADFERI, [2007], *Manifestación de impacto ambiental: Planta Desaladora*, Guerrero, 225 pp.
25. Comisión Estatal del Agua, [2010], *Resumen ejecutivo de la manifestación de impacto ambiental modalidad regional del proyecto sistema de desalación, conducción y entrega de agua potable a la ciudad de ensenada, B. C.*, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 37 pp.
26. Von Medeazza, M., [2005], *"Direct" and socially-induced environmental impacts od desalination*, *Desalination*, **185**: 57-70 pp.
27. Sadhwani, J., *Impacto ambiental en la desalación de aguas*, VII Congreso Nacional del Medio Ambiente, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 8 pp
28. Chesher, R. H. [1975], *Biological impact of a large-scale desalination plant at Key West, Florida*, *Tropical marine pollution*, Ámsterdam, Elsevier Scientific Publishing: 99-181 pp.
29. Abdel-Moati, M. y T. Kureishy, [1997], *Dissolved copper, cadmium and lead in the coastal waters of Qatar, Arabian Gulf*, *Ind. J. Mar. Sci.* **26**: 143-149 pp.

30. U.S. EPA, National Recommended Water Quality Criteria, 206, <http://www.epa.gov/waterscience/criteria/nrwqc-2006.pdf>
31. Hall, W.L. y R.D. Anderson, [1999], *A Deterministic ecological risk assessment for copper in European saltwater environments*, *Mar. Poll. Bull.*, **38**: 27-218 pp.
32. Delyannis, E., [2003], *Historic background of desalination and renewable energies*, *Solar Energy*, **75**: 357-366 pp.
33. Schoijet, M., [2002], *Historia de la energía*, *Elementos*, **44**: 51-57 pp.
34. Kalogirou, S., [2005], *Seawater desalination using renewable energy sources*, *Progress in Energy and Combustion Science*, **31**: 242-281 pp.
35. Brakmann, G., [2004], *Concentrated solar thermal power. Exploting the heat from the sun to combat climate change*, ESTIA, IEA Solar paces and Greenpeace, España.
36. Baalousha, H., [2006], *Desalination status in the Gaza Strip and its environmental impact*, *Desalination*, **196**: 1-12 pp.
37. Wahlgren, R.V., [2001], *Atmospheric water vapour processor designs for potable water production: a review*, *Water. Res.*, **35**:1-22 pp.
38. Awerbuch, L., [1997], Proc, *IDA World Congress on Desalination and Water Reuse*, Madrid, 181 pp.
39. Darwish, M.A., Najem, M. y A. Najem, [2000], *Applied thermal engineering* 20, 399 pp.
40. Spiegler, K.S. y Y. El-Sayed, [1994], *Energy for small potable systems*, A desalination primer, Balaban desalination publications, Santa María Imbaro, Italia.
41. Thomas, K.E., [1997], NREL report TP-440-22083.
42. Buros, O.K., [2000], *The ABCs of desalting*, 2ed. International Desalination Association, Topsfield, Mass.
43. Awerbuch, L., [2207], Proc. International, *Symposium on Desalination of Seawater with Nuclear Energy*, IAEA, 413 pp.
44. Ettouney, H.M., [1999], *Understanding thermal desalination*, *Chemical Engineering Progress*, **95**: 43 pp.
45. Al- Shammiri, M. y M. Safar, [1999], *Multi-effect distillation plants: state of the art* *Desalination*, **126**, 45 pp.
46. Dvornikov, V., [2001], *Seawater multi-effect distillation energized by a combustion turbine*, *Desalination*, **127**, 261 pp.
47. Pique, G.G., [2000], *New device shatters seawater conversion conceptual barriers*, *Water conditioning & purification*, **41**

48. Wilf, M. y K. Klinko, [2001], *Optimization of seawater RO systems design*, *Desalination*, **138**, 299 pp.
49. Glueckstern, R., Thoma, A. y M. Priel, [2001], *The impact of R&D on new technologies, novel design concepts and advanced operating procedures on the cost of water desalination*, *Desalination*, **139**, 217 pp.
50. Rautenbach, R. y K. Voßenkaul, [2001], *Pressure driven membrane processes - the answer to the need of a growing world population for quality water supply and waste water disposal*, *Separation and purification technology*, **22**, 193 pp.
51. Charcossete, C., [2009], *A review of processes and renewable energies for desalination*, *Desalination*, **245**: 214-231 pp.
52. Raluy, R. G., Serra, L. y J. Uche, [2006], *Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies*, *Energy*, **31**: 2361-2372 pp.
53. Anónimo, *Todo lo que deseas saber sobre el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nadie ha sabido explicarte*, Concejalía del medio ambiente, España, 8 pp.
54. Alem, N., M. Luján y D. Bascopé, [2005], *Impacto de la Contaminación del Aire en Enfermedades Respiratorias Atendidas en el Centro Pediátrico Albina Patiño*, Universidad Católica Boliviana, **3**: 56-78 pp.
55. Torres, M., [1996], *La desalación de agua de mar, ¿recurso hídrico alternativo?*, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), 16 pp.
56. Lamela, A. [2006], *Desalinización (o desalación) de agua de mar*, 13 pp.
57. Lesseps, P., *Los óxidos de nitrógeno en el aire y la salud*, Agència de Salut Pública, España, 2 pp.
58. Muñoz, A., Quiroz, C. y J. Paz, [2006], *Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición*, Universidad de Antioquia, Colombia, 171 pp.
59. Castillo, C., *El dióxido de azufre y sus efectos sobre las plantas*, Chile, Universidad de Chile, 108 pp.
60. <http://www.prtr-es.es/NMVOG-COVDM-Compuestos-Organicos-Volaticos,15594,11,2007.html> (Consultada el 24 de octubre de 2011 a las 4:03 pm)
61. [http://es.mimi.hu/medicina/capacidad\\_vital.html](http://es.mimi.hu/medicina/capacidad_vital.html) (Consultada el 24 de octubre de 2011 a las 4.42 pm)
62. García-Rodríguez, L., [2002], *Seawater desalination driven by renewable energies: a review*, *Desalination*, **143**: 103-113 pp

63. Abdul-Fattah, A., [1986], *Selection of solar desalination system for supply of water in remote arid zones*, *Desalination*, **60**: 165-189 pp.
64. Paulsen, K y F. Hensel, [2007], *Design of an autarkic water and energy supply driven by renewable energy using commercially available components*, *Desalination*, **203**: 455-462 pp
65. Peralta, R., *Compensación de los impactos ambientales (emisiones gaseosas introducidas por el suministro eléctrico) a las Instalaciones de Desalación del Programa A.G.U.A., mediante la aportación equivalente de energía de origen renovable*, Congreso Nacional del Medio Ambiente: Cumbre del Desarrollo Sostenible, España, 9 pp
66. Hernández, H. y J. Islas, [2004], *Nuevas energías renovables: una alternativa sustentable para México (Análisis y Propuesta)*, Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República, México, 183 pp.
67. <http://www.miliarium.com/Bibliografia/Monografias/Biocombustibles/CultivosEnergeticos.asp> (consultada el 30 de octubre de 2011 a las 7:39 pm)
68. Romero, Á., [2010], *Producción de agua potable a partir de agua de mar: aprovechamiento integral del sistema mediante la generación de energía a partir de microalgas o de energía solar o eólica*, Facultad de Química, UNAM, México, 238 pp.
69. El-Nashar, A., [1987], *The economics and performance of desalination plants*, *IDA Magazine*, **1**:17-30 pp
70. Madani, A., [1990], Economics of desalination for three plant sizes, *Desalination*, **78**: 187-200 p
71. Lu, H., y A. Swift, [2000], *International Desalination and Water Reuse*, **10**; 35-43 pp
72. Tleimat, M. y E. Howe, [1989], *The use of energy from salt-gradient solar ponds for reclamation of agricultural drainage water in California: Analysis and cost prediction*, *Solar Energy*, **42**: 339-349 pp
73. Suri, R., Al-Marafie, A., Al-Homoud, A. y G. Maheshwari , [1999], *Cost-effectiveness of solar water production*, *Desalination*, **71**: 165-175 pp
74. Bucher, W., [1988], International Conf. On Applications od Solar & Renewable Energy, Cairo.
75. <http://aula2.elmundo.es/aula/laminas/lamina1035449945.pdf> (consultada el 31 de octubre de 2011 a las 11:17 pm)
76. Rabas, T. y C. Panchal, [1991], *Production of desalinated water using ocean thermal energy*, *Oceans*, Nueva York, **1**: 38-45 pp

77. Crerar, A. y C. Pritchard, [1991], *Desalination and Water Re-use*, Institution of Chemical Engineers, 391-398 pp
78. Vásquez, D., [2004], *Posibilidades de la energía geotérmica en Chile: El caso de la octava región*, Depesex, Chile, **35**: 16 pp
79. Karytsas, C., [1996], Mediterranean Conference on Renewable Energy Sources for Water Production, European Commission, EURORED Network, Grecia, 112-116 pp.
80. [http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis\\_De\\_Aguas/Analisis\\_de\\_%20Color1.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Metodos/Analisis_De_Aguas/Analisis_de_%20Color1.htm) (consultada el 05 de noviembre de 2011 a las 9:49 am)
81. [http://ecosofia.org/2008/04/huella\\_hidrica\\_cuanta\\_agua\\_gastamos.html](http://ecosofia.org/2008/04/huella_hidrica_cuanta_agua_gastamos.html) (consultada el 10 de noviembre de 2011 a la 1:10 pm)
82. [http://centrodelagua.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=246%3Adesalacion-situacion-actual-y-perspectivas-futuras-en-america-latina-y-el-caribe&catid=47%3Aarticulos&Itemid=86&lang=es](http://centrodelagua.org/index.php?option=com_content&view=article&id=246%3Adesalacion-situacion-actual-y-perspectivas-futuras-en-america-latina-y-el-caribe&catid=47%3Aarticulos&Itemid=86&lang=es) (consultada el consultada el 10 de noviembre de 2011 a la 1:28 pm)
83. Luege, J. Fernández, A., Martínez, J., y L. Conde, [2006], *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*, México, 32 pp.
84. Anónimo, *Mitigación de emisiones: Estrategia local de acción climática del Distrito Federal*, México, 8 pp.
85. Gutiérrez, C., *Análisis comparativo de las diferentes energías renovables*, Departamento de Física y Química, Colombia, 11 pp.
86. Anónimo, *Curso de desalación de aguas, nuevas tecnologías y uso de energías renovables*, Colegio oficial de Ingenieros Industriales de Andalucía Occidental, 44 pp