

128

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

LA DESALINIZACIÓN, UNA
ALTERNATIVA PARA
EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A:
VIRGILIO RUIZ MAZÓN



296323

MÉXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/079/00

Señor
VIRGILIO RUIZ MAZON
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso la profesora ING. ALBA BEATRIZ VAZQUEZ GONZALEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

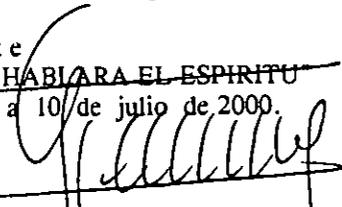
"LA DESALINIZACION, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MEXICO"

- INTRODUCCION**
- I. ENTORNO ACTUAL**
 - II. METODOS DE DESALINIZACION**
 - III. CONSTRUCCION, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS**
 - IV. IMPACTO AMBIENTAL**
 - V. COSTOS Y FINANCIAMIENTO EN LA CONSTRUCCION Y OPERACIÓN DE PLANTAS DESALINIZADORAS**
 - VI. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 10 de julio de 2000.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

ÍNDICE

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
1 CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL.....	3
1.1 EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL TERRITORIO NACIONAL	3
<i>Panorama General.</i>	3
<i>Aspectos geográficos.</i>	3
<i>Características Pluviométricas.</i>	6
<i>Aguas superficiales.</i>	11
<i>Aguas subterráneas.</i>	16
<i>Servicios Hidráulicos Básicos.</i>	18
<i>Administración del agua.</i>	27
1.2 LA DESALINIZACIÓN EN EL MUNDO.	33
<i>La Desalinización del Agua como un Proceso.</i>	33
<i>El desarrollo de la desalinización.</i>	33
<i>Aceptación Mundial.</i>	35
<i>Desalinización en los años 90.</i>	38
2 CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN	41
2.1 ANTECEDENTES	41
2.2 TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN.....	43
2.3 PROCESOS TÉRMICOS.....	45
<i>Destilación por Evaporación en Etapas Múltiples.</i>	47
<i>Destilación por efecto múltiple.</i>	49
<i>Destilación por Compresión de Vapor.</i>	51
2.4 PROCESOS DE MEMBRANA.....	52
<i>Electrodíálisis.</i>	53
<i>Ósmosis Inversa.</i>	57
2.5 PROCESOS MENORES	62
<i>Congelamiento.</i>	62
<i>Destilación por Membrana.</i>	63
<i>Humidificación Solar.</i>	63
2.6 PLANTAS DUALES.....	65
<i>Cogeneración en Termoeléctricas.</i>	66
<i>Cogeneración en Nucleoeléctricas.</i>	66
2.7 INSTALACIONES HÍBRIDAS.....	67
3 CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS.....	69
3.1 ESTUDIOS PREVIOS	69
<i>Estudios Geológicos.</i>	69
<i>Estudios Hidrológicos.</i>	70
<i>Abastecimiento de Agua del Subsuelo.</i>	70
3.2 EXPERIENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE PLANTAS DESTILADORAS.....	71
<i>Criterios Simplificatorios.</i>	72
<i>Componentes que requieren consideraciones especiales debido a su tamaño.</i>	74
<i>Diversas Causas de Suspensión en una Planta MSF.</i>	78

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

ÍNDICE

3.3	EXPERIENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE PLANTAS CON MEMBRANAS.....	79
	<i>Innovaciones en los Procesos de Membrana.....</i>	80
	<i>Rendimiento, Restauración, Autopsia y Análisis de Membranas en Espiral.....</i>	83
3.4	PRETRATAMIENTO DEL AGUA SALADA	87
	<i>Extracción por Medio de Colectores Ranney.....</i>	87
	<i>Pretratamiento del Agua en Plantas que Operan con Membranas.....</i>	89
	<i>Acumulación de Sedimentos en Plantas Destiladoras.....</i>	92
3.5	CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA DESALINIZACIÓN	95
4	CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL.....	99
4.1	MANEJO DEL REMANENTE O SALMUERA	99
	<i>Caso Práctico.....</i>	100
4.2	CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN.....	107
5	CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO.....	116
5.1	COSTO DE CONSTRUCCIÓN	118
5.2	COSTOS DE OPERACIÓN	130
	<i>Energía.....</i>	133
	<i>Operación y Mantenimiento.....</i>	134
	<i>Depreciación e Interés.....</i>	136
5.3	FINANCIAMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN.....	137
	<i>Financiamiento en México.....</i>	138
	<i>Análisis Financiero de Plantas de Doble Propósito.....</i>	151
	CONCLUSIONES.....	158
	BIBLIOGRAFÍA.....	160

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo tiene como objetivo principal mostrar una alternativa para el suministro del vital líquido para aquellas regiones de nuestro país en las que la escasez de agua para consumo doméstico se ha convertido en un problema cotidiano. Los recursos hidráulicos en gran parte del territorio nacional son limitados y su encarecimiento crece en la medida en que la población aumenta. La desalinización como el proceso para producir agua utilizable creado por el ser humano para satisfacer sus necesidades más elementales a partir de agua salada, es uno de los pocos métodos que pueden incrementar la disponibilidad de este recurso vital. Hasta hace muy pocos años, la tecnología de desalinización era vista exclusivamente en términos del tratamiento de aguas salobres o marinas para abastecer a las comunidades; hoy en día la tecnología de desalinización ha rebasado esta frontera y ya es considerada para los tratamientos de los efluentes industriales, reutilización de aguas residuales, recarga de los mantos, producción de agua ultrapura, aguas de regadío, así como en el tratamiento de residuos peligrosos.

En las primeras plantas desalinizadoras los procesos resultaban sumamente costosos, sin embargo, al paso de los años se ha revertido esta tendencia gracias a la experiencia acumulada durante más de medio siglo en el que se ha venido depurando este proceso. En la actualidad, miles de científicos en todo el mundo trabajan incesantemente para la inclusión de mejoras en los procesos de desalinización que día con día logran un abatimiento en los costos de producción, haciendo cada vez más accesible esta tecnología a las naciones en vías de desarrollo.

La desalinización ha llegado a su era. Hoy en día es técnica y económicamente factible generar grandes volúmenes de agua de calidad aceptable a través de la desalinización de agua marina y salobre. El agua ya no puede ser considerada como un recurso infinitamente renovable, la amenaza a las reservas hace del vital líquido un recurso tan crítico como la energía, en contraste con esta última, no existe un sustituto viable y su degradación tanto en cantidad como en calidad tendría impactos sociales y económicos más profundos.

El agua pura es la esencia de la vida y puede ser producida de manera confiable con la ayuda de los procesos de desalinización. El reto es producir agua para mejorar las condiciones de salud, desarrollo y crecimiento de las comunidades a un costo aceptable. La desalinización ofrece a la comunidad mundial una solución para crear agua dulce, mejorar la calidad de las corrientes residuales, resolver problemas ambientales y brindar agua suficiente para un desarrollo sostenido.

En la actualidad más de 120 países utilizan en mayor o menor grado las tecnologías de desalinización, la capacidad total de producción construida y contratada llega a los 22,735,000 metros cúbicos diarios, poco más de la mitad de esta cifra se encuentra concentrada en las naciones del Medio Oriente.

En los últimos dos años se ha observado un incremento significativo en los proyectos desalinizadores. La demanda del vital líquido se ha estado incrementando en una tasa mayor a

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

INTRODUCCIÓN

la demanda de energía eléctrica. A principios de los cincuenta cuando se convirtió en una tecnología a larga escala, la desalinización era un accesorio comprendido dentro de la generación de energía eléctrica; también fue considerado un fenómeno regional asociado principalmente a las naciones del Medio Oriente como una consecuencia del desarrollo industrial y demográfico en dichas regiones debido al apogeo de la era petrolera. Estudios recientes revelan que la disponibilidad de agua dulce per cápita en Latinoamérica se ha reducido a la cuarta parte a partir del año de 1950. Lo anterior nos lleva a concluir que el problema del suministro del vital líquido no es exclusivo de las regiones del Medio Oriente, por lo que los esfuerzos de la comunidad en materia de desalinización deberán incrementarse en aquellas regiones donde aún no se considera el uso de esta tecnología como es el caso de México.

En el caso de nuestro país, los problemas de abastecimiento de agua para consumo municipal se han agravado en los últimos años, sobre todo en aquellas regiones ubicadas en el norte y noroeste, donde la sobreexplotación de los mantos de agua dulce ha generado problemas de desabasto del vital líquido. Es necesario aprovechar la ventana de tiempo existente para proyectar y construir instalaciones que satisfagan las necesidades más elementales de los habitantes de dichas regiones. En el caso de las regiones costeras, México cuenta con más de 11,000 kilómetros de litoral, mismos que permanecen subutilizados en todos sus aspectos de explotación y que pueden ser aprovechados a un nivel inimaginable, considerando la generación de polos de desarrollo costeros que entre otras cosas requerirían abastecerse de agua para consumo municipal.

Debido a la extensión y profundidad de la experiencia acumulada durante cincuenta años, este trabajo no pretende convertirse en una enciclopedia o manual que contenga todo lo relacionado a la desalinización. Su objetivo será el de introducir al lector en el tema de la desalinización y sentar un precedente para que esta tecnología sea considerada para abastecer aquellas regiones del país donde el agua dulce es nula o muy escasa.

En el primer capítulo del presente trabajo, se describe el entorno actual de abastecimiento de agua potable en México así como una breve situación de la desalinización en el mundo. Posteriormente, en el segundo apartado se describen de manera general los procesos de desalinización que han resultado exitosos, incluyendo la simbiosis con los proyectos para generación de electricidad. En el tercer capítulo, se recopilan algunas experiencias recientes relacionadas con la construcción y operación de plantas desalinizadoras, como son los estudios previos, fallas más comunes, materiales empleados, etc. Por su importancia, se decidió crear un capítulo (en este caso el cuarto), dedicado al impacto ambiental que producen estas plantas. Finalmente se incluyó un quinto capítulo que habla de los costos y financiamiento de los proyectos desalinizadores.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

1 CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

1.1 EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN EL TERRITORIO NACIONAL.

PANORAMA GENERAL.

El agua dulce está disponible como cuerpos de agua superficial (lagos y embalses), como escurrimiento superficial y como agua subterránea. Esta última se integra por la recarga natural renovable y la inducida por la infiltración en zonas de riego principalmente.

La temporalidad de la lluvia y los escurrimientos no permiten aprovechar el recurso de acuerdo a las demandas, por lo que se debe construir infraestructura para almacenamiento y regulación.

El agua se aprovecha en diversos usos que se diferencian por ser consuntivos y no consuntivos. Los primeros impactan en la disponibilidad porque aprovechan el agua y sólo retornan una parte de ésta; los no consuntivos, como el uso en generación hidroeléctrica, retornan la totalidad del agua aprovechada. Se estima que en 1995 la extracción total para los usos principales fue de 186.7 km³, de los cuales 73.5 km³ se destinaron para los consuntivos, distribuidos de la siguiente manera: agrícola 61.2 km³, doméstico 8.5 km³, industrial 2.5 km³, acuicultura intensiva 1.3 km³; los restantes 113.2 km³ se destinaron para la generación de energía hidroeléctrica, clasificada como no consuntiva.

Por otra parte, se generan diferencias en la disponibilidad del agua a lo largo del territorio porque la contaminación de los cuerpos de agua limita algunos de los usos. La contaminación afecta tanto al agua superficial como al agua subterránea y disminuye notablemente la disponibilidad determinada en los balances volumétricos, ya que en muchos casos existirá el recurso pero no podrá utilizarse por su mala calidad.

Es conveniente señalar que el conocimiento de los recursos hidráulicos del país aún es insuficiente debido, por una parte, a la extensión del territorio, y por la otra a la propia naturaleza del agua, que obliga a medirla en las diversas fases del ciclo hidrológico, en cantidad y calidad. Además, la demanda del recurso se genera por cientos de miles de usuarios, con problemas específicos y puntuales.

Bajo esas consideraciones, la integración nacional de la disponibilidad y uso del agua, así como de los problemas derivados de la distribución de la población y la actividad económica, parten de los análisis regionales que reúnen cuencas con características similares.

ASPECTOS GEOGRÁFICOS.

Con una superficie territorial menor que la de Canadá, Estados Unidos, Brasil y Argentina, nuestro país se encuentra en el segundo lugar en lo que a longitud de litoral en el continente

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

americano se refiere, y que consecuentemente, lo ubica en una situación privilegiada respecto a las demás naciones. Esta enorme extensión de costas no sólo es importante para el desarrollo pesquero y de transporte, sino también debe ser tomada en cuenta como una posible reserva del líquido vital.

A continuación, se muestran las características geográficas generales de nuestro país:

Superficie territorial (km²) 1,964,375

Continental 1,959,248

Insular 5,127

Superficie de la Zona Económica Exclusiva (km²) * 3,149,920

Océano Pacífico 2,320,380

Golfo de México y mar Caribe 829,540

Longitud de la línea de costa (Km) 11,122

Océano Pacífico 7,828

Golfo de México y mar Caribe 3,294

FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía. Carta Topográfica 1: 50 000.

NOTA: Los datos pueden diferir respecto a los presentados en otras publicaciones, debido a que la fuente llevó a cabo una actualización de los mismos con base a procesos digitales semiautomatizados, que proporcionan una mayor exactitud en la medición de las dimensiones del territorio mexicano.

* Incluye islas y mar territorial.

De las 32 entidades federativas existentes, 17 cuentan con línea de costa, quedando otras 15 que no cuentan con salida al mar. Esta información se presenta a detalle en el Cuadro 1. 1.

Cuadro 1. 1

CAPITALES, ALTITUD, LONGITUD DE LA LÍNEA DE COSTA, MUNICIPIOS Y SUPERFICIE DEL TERRITORIO CONTINENTAL SEGÚN ENTIDAD FEDERATIVA

Entidad	Capital	Altitud (msnm)	Longitud de la Línea de Costa (Km.)	Municipios	Superficie Continental (Por ciento)
1 Aguascalientes	Aguascalientes	1,870	0	11	0.3
2 Baja California	Mexicali	10	1,493	5	3.7
3 Baja California Sur	La Paz	30	2,131	5	3.8

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

4 Campeche	Campeche	10	425	11	2.9
5 Coahuila	Saltillo	1,600	0	38	7.7
6 Colima	Colima	490	142	10	0.3
7 Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	520	266	118	3.8
8 Chihuahua	Chihuahua	1,440	0	67	12.6
9 Distrito Federal	México	2,240	0	16	0.1
10 Durango	Durango	1,880	0	39	6.3
11 Guanajuato	Guanajuato	2,000	0	46	1.6
12 Guerrero	Chilpancingo	1,300	522	76	3.2
13 Hidalgo	Pachuca	2,400	0	84	1.1
14 Jalisco	Guadalajara	1,540	351	124	4
15 México	Toluca	2,660	0	122	1.1
16 Michoacán	Morelia	1,920	228	113	3
17 Morelos	Cuernavaca	1,510	0	33	0.2
18 Nayarit	Tepic	920	296	20	1.4
19 Nuevo León	Monterrey	540	0	51	3.3
20 Oaxaca	Oaxaca	1,550	568	570	4.8
21 Puebla	Puebla	2,160	0	217	1.7
22 Querétaro	Querétaro	1,820	0	18	0.6
23 Quintana Roo	Chetumal	10	1,176	8	2.2
24 San Luis Potosí	San Luis Potosí	1,860	0	58	3.1
25 Sinaloa	Culiacán	60	622	18	2.9
26 Sonora	Hermosillo	210	1,209	72	9.2
27 Tabasco	Villahermosa	10	200	17	1.3
28 Tamaulipas	Ciudad Victoria	320	433	43	4.1
29 Tlaxcala	Tlaxcala	2,240	0	60	0.2
30 Veracruz	Xalapa	1,460	720	210	3.7
31 Yucatán	Mérida	10	340	106	2
32 Zacatecas	Zacatecas	2,420	0	57	3.8
Totales			11,122	2,443	100.0

FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

CARACTERÍSTICAS PLUVIOMÉTRICAS

El sistema hidrológico de México constituye uno de los factores fundamentales para determinar muchos de los procesos de desarrollo del país, en virtud de sus profundas implicaciones ambientales, económicas y sociales. Tanto en el sector agroproductivo como en el urbano-industrial, el potencial de México depende en la actualidad, en gran medida, de la disponibilidad natural del agua que se precipita sobre el territorio nacional con marcadas desigualdades espaciales y temporales.

El estar sujetos a la disponibilidad del agua que se precipita, limita de forma sustancial el desarrollo de aquellas regiones donde la precipitación del vital líquido es escasa; debemos de tener presente que dos terceras partes del territorio son áridas y semiáridas; el resto varía de templado a muy húmedo. De los 772 mm de lluvia que en promedio se precipitan anualmente, 67% ocurre de junio a septiembre, lo que dificulta su aprovechamiento a lo largo del ciclo anual. Se presentan periódicamente profundas sequías y lluvias torrenciales, a veces asociadas con huracanes, lo que provoca severos daños en amplias zonas del territorio nacional. Los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos se acrecientan en la medida en que la deforestación impide la retención o filtración del agua, intensificando el escurrimiento, la erosión hídrica, el arrastre de sólidos y el azolve de cauces y presas. Otro factor que agrava los riesgos deriva de la localización inadecuada e irregular de los asentamientos humanos, con frecuencia ubicados en cauces de ríos.

La variación de la lluvia a lo largo del año y su distribución espacial, aunada a la desigual distribución de la demanda, generan problemas de escasez que se agravan por la baja eficiencia con que se usa el recurso. Por otro lado, la infraestructura hidráulica no se aprovecha plenamente debido a que se encuentra inconclusa, se opera con deficiencia, o falta mantenimiento.

Adicionalmente, las sequías han impactado severamente el abastecimiento de agua a las poblaciones, la agricultura y la generación de electricidad. El norte del país es la zona más afectada por estos fenómenos.

También se presentan problemas por exceso de agua generados por fenómenos meteorológicos extremos, que originan grandes escurrimientos que al no poder ser regulados y almacenados, originan inundaciones.

El Cuadro 1. 2 enlista los promedios de temperatura y precipitación registrados durante el año de 1998. Cabe señalar que dichos promedios, al haberse obtenido de manera general en cada estado, no representan las características de algunas regiones en particular, donde las condiciones climáticas pueden variar sustancialmente a lo largo de unos pocos kilómetros.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Cuadro 1. 2
TEMPERATURAS MÍNIMAS, MÁXIMAS Y PRECIPITACIÓN PROMEDIO POR
ENTIDAD FEDERATIVA

<i>Entidad Federativa</i>	<i>T mín-máx (°C)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>
<i>Aguascalientes</i>	<i>10-18</i>	<i>300-600</i>
<i>Baja California</i>	<i>10-22</i>	<i>0-300</i>
<i>Baja California</i>	<i>18-26</i>	<i>0-300</i>
<i>Campeche</i>	<i>Más de 26</i>	<i>1000-2000</i>
<i>Coahuila</i>	<i>10-22</i>	<i>100-600</i>
<i>Colima</i>	<i>22-26 y más</i>	<i>600-2000</i>
<i>Chiapas</i>	<i>10-más de 26</i>	<i>1000-más de 4000</i>
<i>Chihuahua</i>	<i>Menos de 10-22</i>	<i>100-2000</i>
<i>Distrito Federal</i>	<i>10-18</i>	<i>600-2000</i>
<i>Durango</i>	<i>Menos de 10-22</i>	<i>300-2000</i>
<i>Guanajuato</i>	<i>10-22</i>	<i>300-1000</i>
<i>Guerrero</i>	<i>10-más de 26</i>	<i>600-2000</i>
<i>Hidalgo</i>	<i>10-22</i>	<i>300-4000</i>
<i>Jalisco</i>	<i>10-más de 26</i>	<i>300-2000</i>
<i>México</i>	<i>Menos de 10-26</i>	<i>600-2000</i>
<i>Michoacán</i>	<i>10-más de 26</i>	<i>300-2000</i>
<i>Morelos</i>	<i>10-26</i>	<i>1000-2000</i>
<i>Nayarit</i>	<i>18-más de 26</i>	<i>1000-2000</i>
<i>Nuevo León</i>	<i>10-26</i>	<i>300-1000</i>
<i>Oaxaca</i>	<i>10-más de 26</i>	<i>300-más de 4000</i>
<i>Puebla</i>	<i>10-26</i>	<i>300-4000</i>
<i>Querétaro</i>	<i>10-22</i>	<i>300-1000</i>
<i>Quintana Roo</i>	<i>22-más de 26</i>	<i>1000-2000</i>
<i>San Luis Potosí</i>	<i>10-22</i>	<i>300-2000</i>
<i>Sinaloa</i>	<i>18-26</i>	<i>100-2000</i>
<i>Sonora</i>	<i>10-26</i>	<i>0-600</i>

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Tabasco	Más de 26	2000-más de 4000
Tamaulipas	18-26	300-2000
Tlaxcala	Menos de 10-18	300-1000
Veracruz	10-26	1000-4000
Yucatán	22-más de 26	600-2000
Zacatecas	10-22	300-1000

FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía.

La Figura 1. 1 muestra la precipitación media anual 1941-1997 según la CNA; de la misma puede observarse que existen regiones en Tabasco y Chiapas, donde el promedio anual excede los 3000 mm. de lámina de precipitación; en contraste, existen enormes extensiones en el norte y noroeste, donde la precipitación no llega a los 500 mm. Las condiciones naturales antes mencionadas se combinan adversamente con el hecho de que la mayor parte de la población y de la actividad económica del país se concentra donde el agua es más escasa: sólo 28% del escurrimiento ocurre donde habita 77% de la población y se genera el 84% del Producto Interno Bruto, lo que ha propiciado una fuerte competencia por el agua, contaminación del recurso así como la sobreexplotación de los acuíferos (véase Figura 1. 2 Distribución del PIB y del escurrimiento de acuerdo a la CNA). Los balances hidráulicos realizados al nivel de cuenca hidrológica muestran un panorama más realista sobre la disponibilidad del agua, pero se requieren estudios más detallados para el conocimiento de situaciones puntuales.

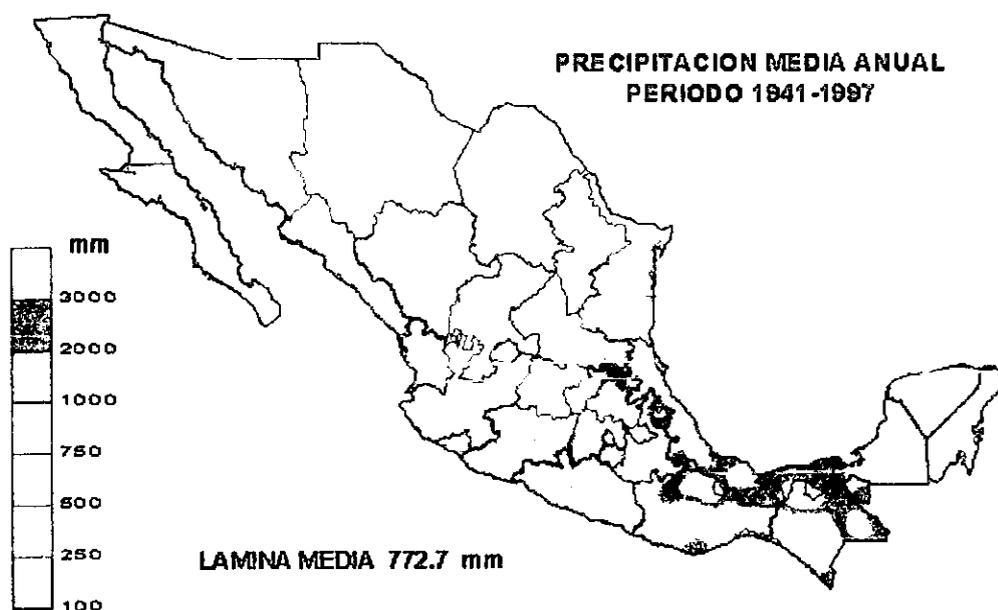


Figura 1. 1

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

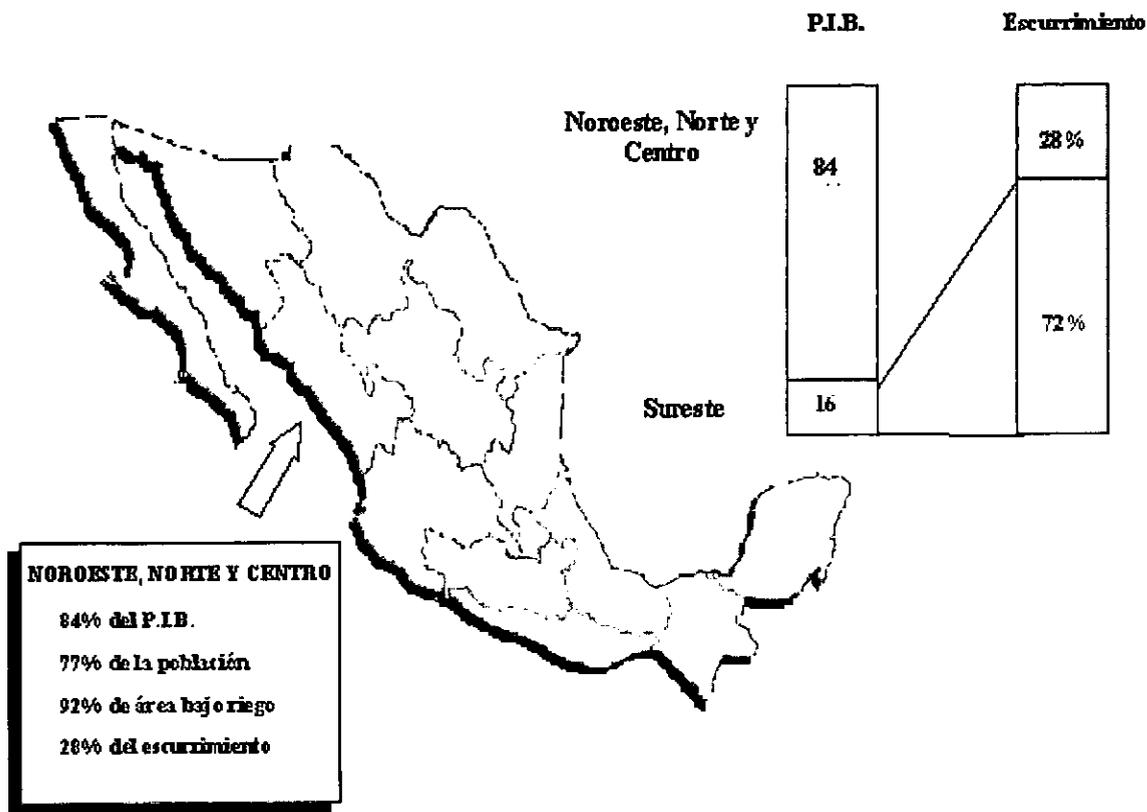


Figura 1. 2. Distribución del PIB y del escurrimiento

La precipitación pluvial anual promedio en el territorio nacional en los últimos años, es de 777 mm, lo que equivale a un volumen de 1522 km³. En la mayor parte del país, las principales lluvias ocurren durante el verano, entre los meses de junio a septiembre (ver Figura 1. 3. Precipitación media mensual a nivel nacional). La excepción es la Región Noroeste, donde se presentan dos ciclos lluviosos en el año, uno en verano y otro en invierno.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

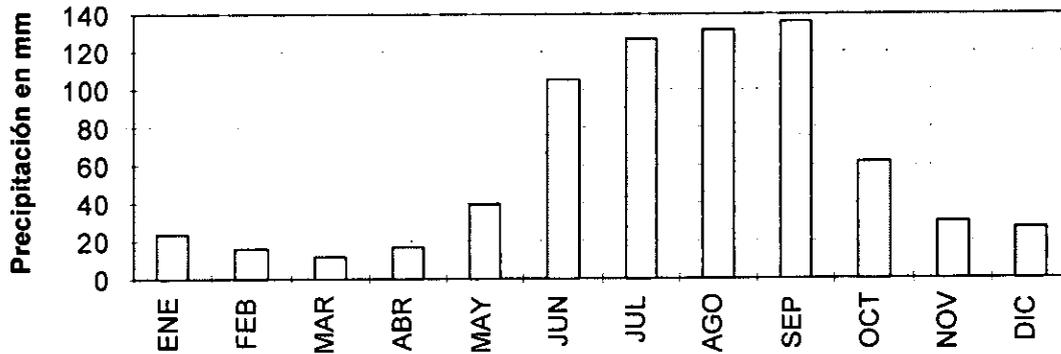


Figura 1. 3. Precipitación media mensual a nivel nacional

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1975-1994

Además de las variaciones mensuales, existen variaciones anuales con periodos extraordinarios de sequía que duran de uno a tres años. De igual forma, se presentan fenómenos meteorológicos extremos como los ciclones tropicales, las granizadas y nevadas extraordinarias.

Las situaciones de emergencia como las inundaciones que periódicamente afectan algunas regiones costeras y del sur, provocan grandes pérdidas humanas y materiales, ponen en riesgo la operación óptima de las fuentes de abastecimiento de agua y, en casos extremos, interrumpen el servicio, siendo necesarias acciones emergentes de saneamiento básico, desinfección y regularización del suministro de agua con el fin de prevenir la aparición de brotes epidémicos, así como proporcionar los volúmenes mínimos requeridos para consumo humano.

Los ciclones tropicales ocurren de mayo a noviembre y afectan tanto a las costas del Pacífico como a las del Golfo de México y del Caribe con incidencias del 40% en Yucatán y Quintana Roo y del 25% en la península de Baja California y en Sinaloa. Las granizadas se presentan durante los meses de mayo a agosto y afectan a las mesetas central y del norte, mientras que las nevadas ocurren con mayor frecuencia en la sierra de Chihuahua.

Con cierta frecuencia se presentan periodos de sequías en el norte del país. En los últimos 50 años se han registrado tres periodos críticos: el primero de 1948 a 1954, el segundo, de 1960 a 1964 y el más reciente, iniciado en 1993, afecta aún a los estados de Coahuila, Chihuahua, Durango, Nuevo León y Tamaulipas. La frecuencia promedio con que se presentan las sequías es de una cada diez años y con duraciones de uno a tres años. Sobresalen las cuencas del Nazas y del Alto Bravo con periodos notorios de escasez.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

AGUAS SUPERFICIALES

El 73% de la lluvia se evapora o evapotranspira. El resto da origen a un escurrimiento anual medio de 410 km³ y a una recarga natural de acuíferos de 53 km³. Las condiciones de los recursos hidráulicos ponen en desventaja a nuestro país en relación con sus principales socios comerciales. Sin considerar los problemas de contaminación en algunos cuerpos de agua y la dificultad para aprovechar lluvias torrenciales, la disponibilidad natural base media per cápita en el territorio mexicano es de aproximadamente 5,000 m³/hab./año (1998), cantidad 50% menor a la de Estados Unidos y que representa tan sólo 5% con respecto a la de Canadá.

El escurrimiento superficial virgen promedio anual es de 410 km³ y la infraestructura hidráulica actual proporciona una capacidad de almacenamiento del orden de 120 km³, lo que se traduce en una capacidad de regulación del orden de 82 km³. De esta capacidad de regulación, 26 km³ son exclusivamente para generación de energía eléctrica, 49 km³ se utilizan para la satisfacción de demandas consuntivas, y el resto se evapora. El Cuadro 1. 3 contiene la información correspondiente al balance de agua superficial. Como se podrá observar, la región que cuenta con mayor cantidad del vital líquido, es el sureste, seguida por la región del Lerma-Balsas.

Cuadro 1. 3
Balance de agua superficial, km³/año

Gerencia Regional	Disponibilidad hidráulica			Extracción para usos Consunt.	Export (*)	Evap. Vasos	Balance
	Esc. Virgen	Retorno Utilizab.	Import(*)				
Noroeste	27.2	0.08	1.85	17.3	0.00	1.25	10.6
Norte	9.8	0.71	0.07	7.7	0.43	1.31	1.1
Noreste	42.3	1.47	0.00	5.3	0.07	0.82	37.6
Lerma-Balsas	76.0	0.00	0.00	12.0	0.37	3.08	60.6
Valle de México	1.8	0.37	0.36	2.5	0.00	0.10	0.0
Sureste	253.6	0.35	0.01	4.4	0.00	0.00	248.7
Nacional	410.7	2.98	1.93	49.2	0.43	6.56	357.6

- Se importan de E.U. 1.85 km³/año a la región Noroeste y 0.07 a la región Norte y se exportan a E.U. 0.43 de la región Norte, comprometidos mediante acuerdos de carácter internacional, así como 47.0 importados de Guatemala en la Región Sureste, sobre los cuales no existe convenio. Las demás importaciones y exportaciones son transferencias entre cuencas nacionales. Fuente: Comisión Nacional del Agua.

- FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía.

El 50% del volumen escurrido se genera en tan sólo el 20% de la superficie del país localizada en el sureste, mientras que el 4% del escurrimiento se genera en la parte norte del país en una superficie del orden del 30% del territorio nacional. En la península de Baja California, norte de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Sonora y la mesa del Norte existen zonas áridas en donde prácticamente no hay escurrimientos superficiales. En contraste, en la vertiente del Golfo y en el resto de la vertiente del Pacífico existen zonas donde el escurrimiento es alto y el drenaje natural es insuficiente, por lo que se presentan inundaciones con frecuencia. La disponibilidad relativa de agua superficial se muestra en la Figura 1. 4.

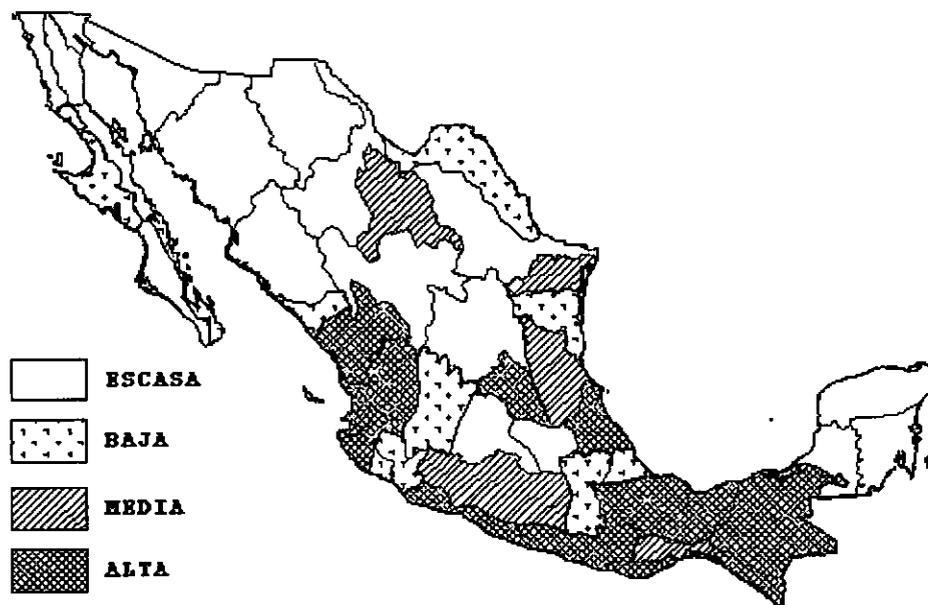


Figura 1. 4

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1994

En las zonas altas de algunas cuencas se presentan graves problemas por erosión hídrica. Se estima que de 12 millones de hectáreas tropicales que existían originalmente en el país, sólo quedan del orden de 800 mil concentradas en la selva Lacandona, Los Chimalapas, Los Tuxtlas, el Uxpanapa, La Chinantla y restos de La Huasteca y Tuxtepec.

Por lo que respecta a la calidad del agua, con la información de la red nacional de monitoreo se evaluaron las condiciones que prevalecen en las principales cuencas del país, mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) que toma en cuenta 16 parámetros. Se concluyó que prácticamente todos los cuerpos de agua importantes tienen grandes zonas contaminadas. La Figura 1. 5 muestra el panorama general de la calidad del agua superficial..

Se considera que por su nivel de contaminación, se requiere atención prioritaria en las siguientes 15 cuencas: Pánuco, Lerma, Balsas, San Juan, Coatzacoalcos, Blanco, Papaloapan, Valle de México, Conchos, Coahuayana, Culiacán, Fuerte, Yaqui, Mayo y Bajo Bravo.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

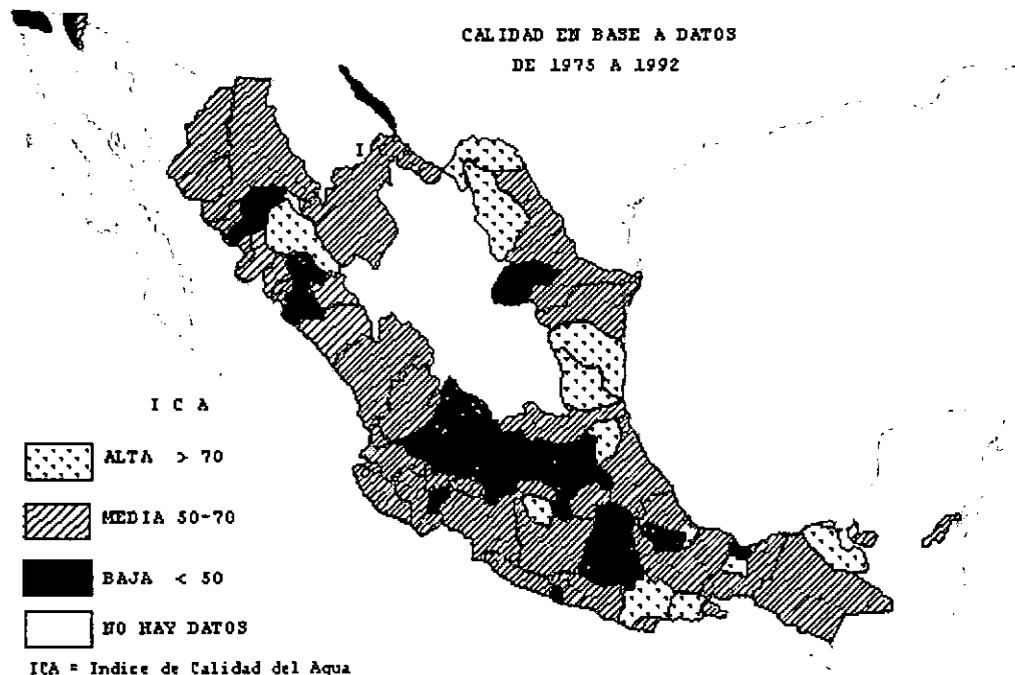


Figura 1. 5

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1994

Con relación a la infestación por malezas acuáticas, favorecida por la existencia de nutrientes (fósforo y nitrógeno) provenientes de retornos agrícolas y descargas de aguas residuales domésticas o industriales, se han infestado del orden de 68 mil hectáreas en 268 cuerpos de agua, 10 mil km de canales y 14 mil km de drenes. Este problema propicia el desarrollo de insectos y otros organismos vectores de enfermedades, desalienta el desarrollo de actividades recreativas, afecta la pesca y la navegación, provoca una pérdida excesiva de agua por evapotranspiración, disminuye la capacidad de los embalses, impide el uso eficiente de las obras hidráulicas e incrementa los costos de operación de las mismas. Actualmente CNA atiende a través del Programa de Control de Malezas Acuáticas (PROCMA) que se desarrolla principalmente en las presas Solís, Endhó, Madín, Barraje de Ibarra, Valle de Bravo y Melchor Ocampo, así como en las lagunas de San Miguel Almaya y de Zumpango.

Debido a las condiciones topográficas del país, los ríos existentes se pueden considerar como jóvenes, esto principalmente debido a su dificultad para ser navegados, así como su rápido escurrimiento al mar, lo que imposibilita su explotación y los reduce, con la construcción de presas, a las funciones de generación de electricidad, regulación de avenidas, y, en algunos casos, para el riego agrícola. En el Cuadro 1. 4 se muestran los ríos más importantes de nuestro país, indicándose hacia dónde vierten, así como su ubicación geográfica.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Cuadro 1. 4

PRINCIPALES RÍOS POR VERTIENTE SEGÚN LOCALIZACIÓN

<i>LOCALIZACION</i>	<i>OCEANO PACIFICO (OCCIDENTAL)</i>	<i>GOLFO DE MEXICO Y MAR CARIBE (ORIENTAL)</i>	<i>INTERIORES</i>
<i>Norte</i>	<i>Colorado</i>	<i>Bravo</i>	<i>Nazas</i>
	<i>Yaqui</i>	<i>Conchos</i>	
	<i>Fuerte</i>	<i>San Juan</i>	
	<i>Sinaloa</i>	<i>Pánuco</i>	
	<i>Culiacán</i>		
	<i>San Lorenzo</i>		
	<i>Piactla</i>		
	<i>Presidio</i>		
	<i>Bahuarte</i>		
	<i>Acaponeta</i>		
<i>Centro</i>	<i>Mezquital</i>	<i>Tuxpan</i>	
	<i>Lerma-Santiago</i>	<i>Cazones</i>	
	<i>Ameca</i>	<i>Nautla</i>	
	<i>Armería</i>	<i>Antigua</i>	
	<i>Coahuayana</i>	<i>Jamapa</i>	
	<i>Balsas</i>	<i>Blanco</i>	
	<i>Papaloapan</i>		
<i>Sur</i>	<i>Papagayo</i>	<i>Coatzacoalcos</i>	
	<i>Ometepec</i>	<i>Grijalva</i>	
	<i>Verde</i>	<i>Usumacinta</i>	
	<i>Tehuantepec</i>	<i>Candelaria</i>	
	<i>Suchiate</i>	<i>Hondo</i>	

FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía.

En las corrientes nacionales existen cerca de 4000 obras de almacenamiento y/o control. De ellas, 640 están clasificadas como grandes presas. El Cuadro 1. 5 muestra las principales presas existentes en el país, así como sus principales finalidades.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

**Cuadro 1. 5
PRINCIPALES PRESAS, CAPACIDAD, PRINCIPAL FINALIDAD,
CORRIENTE Y UBICACIÓN**

<i>PRESA</i>	<i>CAPACIDAD</i> <i>(Millones m³)</i>	<i>PRINCIPAL</i> <i>FINALIDAD</i>	<i>CORRIENTE</i>	<i>ENTIDAD</i> <i>FEDERATIVA</i>
<i>La Angostura (Belisario Domínguez)</i>	<i>20,217</i>	<i>G. CA.</i>	<i>Grijalva</i>	<i>Chiapas</i>
<i>Nezahualcóyotl (Malpaso)</i>	<i>14,028</i>	<i>G. CA. R.</i>	<i>Grijalva y La Venta</i>	<i>Chiapas</i>
<i>El Infiernillo</i>	<i>11,860</i>	<i>G. CA.</i>	<i>Balsas y Tepalcatepec</i>	<i>Michoacán-Guerrero</i>
<i>Chicoasén</i>	<i>11,883</i>	<i>G.</i>	<i>Grijalva</i>	<i>Chiapas</i>
<i>Presidente Alemán (Temascal)</i>	<i>9,106</i>	<i>G. CA. R.</i>	<i>Tonto</i>	<i>Oaxaca</i>
<i>Internacional La Amistad</i>	<i>7,000</i>	<i>G. CA. R. AP.</i>	<i>Bravo</i>	<i>Coahuila</i>
<i>Aguamilpa</i>	<i>7,000</i>	<i>G. CA. R.</i>	<i>Santiago</i>	<i>Nayarit</i>
<i>Miguel de la Madrid Hurtado (Cerro de Oro)</i>	<i>5,380</i>	<i>G. CA.</i>	<i>Santo Domingo</i>	<i>Oaxaca-Veracruz</i>
<i>Vicente Guerrero (Las Adjuntas)</i>	<i>5,283</i>	<i>CA. R. AP.</i>	<i>Soto la Marina</i>	<i>Tamaulipas</i>
<i>Internacional Falcón</i>	<i>4,908</i>	<i>G. CA. R. AP.</i>	<i>Bravo</i>	<i>Tamaulipas</i>
<i>Alvaro Obregón (Oviachic)</i>	<i>4,200</i>	<i>G. CA. R.</i>	<i>Yaqui</i>	<i>Sonora</i>
<i>Adolfo López Mateos (El Humaya)</i>	<i>4,064</i>	<i>G. CA. R.</i>	<i>Humaya</i>	<i>Sinaloa</i>
<i>Lázaro Cárdenas (El Palmito)</i>	<i>4,438</i>	<i>R.</i>	<i>Nazas</i>	<i>Durango</i>
<i>Miguel Hidalgo (El Mahone)</i>	<i>4,030</i>	<i>G. CA. R. AP.</i>	<i>Fuerte</i>	<i>Sinaloa</i>

AP: Agua potable; CA: Control de avenidas; G: Generación de energía eléctrica; R: Riego.

FUENTE: SAGAR. CONAGUA.

Los problemas que enfrentan las obras de almacenamiento y control se pueden resumir en tres grupos:

- a) Se estima que del universo de obras, 700 presas tienen más de 30 años de haber entrado en servicio, 400 tienen entre 20 y 30 años, y el resto es de reciente construcción; además, la mayoría de ellas carece de mantenimiento y conservación.*
- b) Los primeros estudios hidrológicos realizados en nuestro país para determinar las capacidades de almacenamiento requeridas para el control de avenidas y los diseños de las*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

obras de excedencias fueron realizados con escasa información, por lo que se han dado casos de que algunas avenidas de diseño han sido alcanzadas, e incluso superadas.

- c) La reducción en la capacidad útil de almacenamiento de las presas y de conducción de los cauces, ocasionado por los azolves, así como la falta de mantenimiento en equipos y estructuras, y la escasa capacidad de descarga de algunas presas, incrementan los riesgos de falla de las estructuras hidráulicas.

Para la operación de presas en época de avenidas se recibe información diaria de aproximadamente 600 estaciones climatológicas y 200 hidrométricas; este número de estaciones es insuficiente para cubrir las necesidades de la vasta extensión territorial del país, para operar en tiempo real la infraestructura hidráulica de control y para alertar a la población en situaciones de emergencia.

Además de los lagos artificiales generados por las presas, se cuenta con formaciones naturales; a continuación, el Cuadro 1. 6 muestra el conteo de los depósitos de agua existentes en toda la nación.

Cuadro 1. 6
SUPERFICIE TOTAL DE LOS DEPÓSITOS DE AGUA LOCALIZADOS
SEGÚN TIPO DE DEPÓSITO

TIPO DE DEPOSITO	SUPERFICIE (miles de Km ²)
Total	278
Depósitos de agua dulce	123
Naturales	75
Lagos y lagunas de la vertiente del Océano Pacífico	21
Lagos y lagunas de la vertiente del Golfo de México	11
Pantanos (Veracruz, Tabasco y Campeche)	43
Artificiales	48
Vasos de almacenamiento (Presas)	48
Depósito de agua salobre en lagunas, litorales, bahías y esteros	155

FUENTE: INEGI. Dirección General de Geografía.

AGUAS SUBTERRÁNEAS

La recarga natural promedio de los acuíferos es de 48 km³ anuales, que sumada a la recarga inducida en zonas de riego, que se estima del orden de 15 km³, resulta en una recarga total igual a 63 km³.

Se han identificado en el país 459 acuíferos, para los que se estima una extracción total de 24 km³ anuales a través de aproximadamente 140 mil aprovechamientos subterráneos. Se han

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

detectado problemas de sobreexplotación en 80 acuíferos ubicados principalmente en las regiones noroeste, norte y Lerma-Balsas. La distribución de agua subterránea y de los acuíferos sobreexplotados a nivel nacional se muestra en la Figura 1. 6.

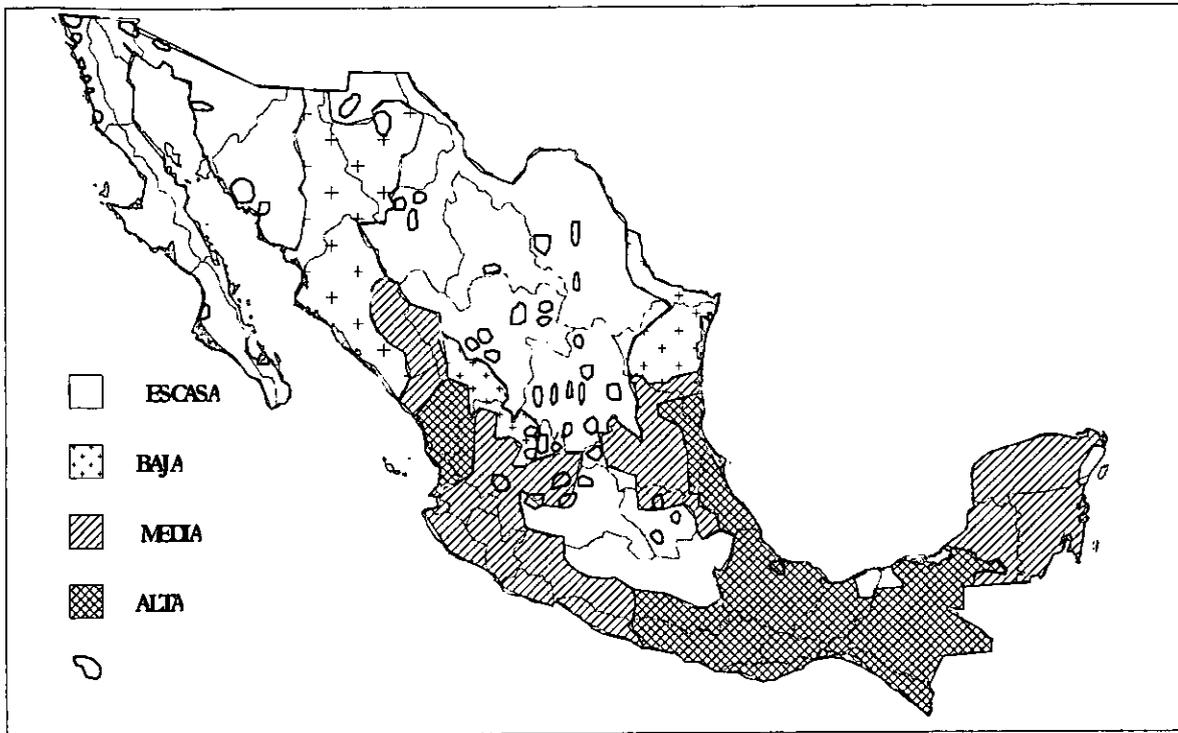


Figura 1. 6

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1994

La sobreexplotación ha inducido problemas de intrusión marina en los siguientes acuíferos: San Quintín, Maneadero, San Vicente, San Rafael, San Telmo, Vicente Guerrero y Camalú, en el estado de Baja California; Santo Domingo, San José del Cabo y La Paz, en Baja California Sur; Caborca, Hermosillo y Guaymas, en el estado de Sonora; y en Veracruz, Ver. Asimismo, han aumentado los problemas por concentración de sales en los acuíferos del valle del Guadiana en Durango, valle de Aguascalientes, y la Región Lagunera. Por otra parte, las descargas de aguas residuales han contaminado los acuíferos localizados en los valles de Aguascalientes; San Luis Potosí; Mezquital en Hidalgo; León, Celaya y Salamanca, en Guanajuato; y Mérida, Yucatán, entre otros.

Los resultados de los balances geohidrológicos por región administrativa se presentan en el Cuadro 1. 7.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Cuadro 1. 7
Balance de agua subterránea, km³/año

<i>Región</i>	<i>Número de Acuíferos</i>	<i>Recarga</i>	<i>Extracción</i>	<i>Disponib.</i>	<i>Acuíferos con más del 20% de Sobreexp.</i>
<i>Noroeste</i>	149	5.10	5.01	0.09	20
<i>Norte</i>	86	4.87	5.00	-0.13	20
<i>Noreste</i>	61	1.65	1.45	0.20	17
<i>Lerma-Balsas</i>	92	8.16	7.40	0.75	19
<i>Valle de México</i>	26	1.96	3.08	-1.13	3
<i>Sureste</i>	45	40.80	1.99	38.82	1
<i>Nacional</i>	459	62.39	23.93	38.60	80

Fuente: Comisión Nacional del Agua. 1994

SERVICIOS HIDRÁULICOS BÁSICOS

El acceso a servicios básicos adecuados de agua potable y saneamiento constituye un componente fundamental para la salud pública y el bienestar de la sociedad. La población de México sigue creciendo, aunque la tasa a la que lo hace ha venido disminuyendo, siendo en la actualidad cercana a 1.8% anual. En función de este crecimiento demográfico, se requiere hacer un gran esfuerzo tan sólo para mantener las coberturas existentes en los servicios básicos relacionados con los recursos hidráulicos. Abatir los rezagos históricos en dichas coberturas implicaría una movilización adicional de recursos, difícil de concretar en un contexto de austeridad y reducción presupuestal para el sector público.

En México existen 201,138 localidades, de las cuales 98.6% son rurales (de menos de 2,500 habitantes) en tanto que sólo 1.4% son urbanas (de más de 2,500 habitantes). El 73.5% de la población se ubica en localidades urbanas. Cabe mencionar que en 169 localidades —que representan tan sólo 0.1% de las localidades del país— se ubica 51% de la población (véase Cuadro 1. 8 y Figura 1. 7. Distribución de la población por tamaños de localidades.).

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Cuadro 1. 8

Número de habitantes en los ámbitos rural y urbano 1998

	<i>Población Total (Millones)</i>	<i>Población Total (%)</i>	<i>Núm. De Localidades</i>	<i>% de Localidades</i>
<i>Grandes ciudades (Más de 50 mil habitantes)</i>	49.9	51.3	169	0.1
<i>Ciudades medias(De 2,500 a 50 mil habitantes)</i>	21.8	22.3	2,658	1.3
<i>Comunidades rurales (menos de 2,500 habitantes)</i>	25.6	26.3	198,311	98.6
Total	97.3	100	201,138	100

Nota: Se actualiza el número de habitantes tomando como base la población del Censo de Población y Vivienda 1995, INEGI. Se considera constante el número de localidades.

Fuente: Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (diciembre de 1998), CNA.

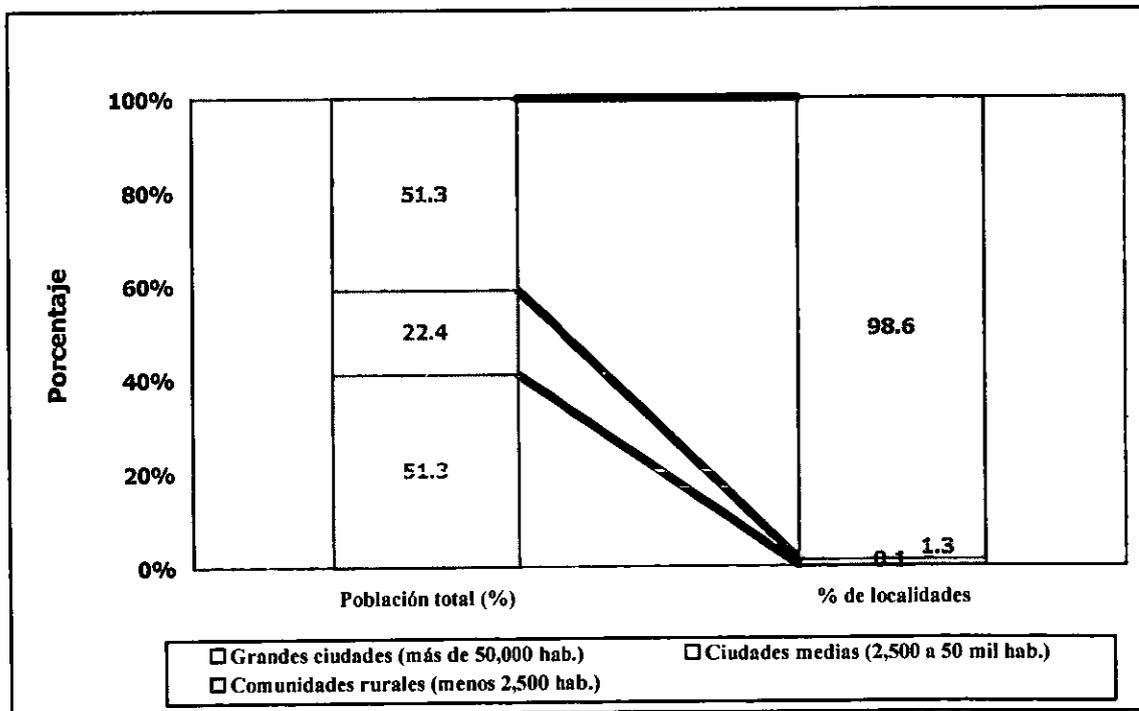


Figura 1. 7. Distribución de la población por tamaños de localidades

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

En lo que se refiere al acceso al agua potable, entre 1995 y 1999 la cobertura del servicio a nivel nacional logró aumentar gracias a un enorme esfuerzo para suministrar por primera vez el líquido a cerca de 7.6 millones de nuevos usuarios, tanto urbanos como rurales, lo que representa una magnitud poblacional equivalente a la de un país completo como Austria, o Bolivia. A fines de 1999, la cobertura nacional del servicio de agua potable era de 86.7 por ciento, el Cuadro 1. 9 muestra la evolución histórica en los servicios de agua potable para el período 1995-1999. En las zonas urbanas casi 67.6 millones de personas cuentan ya con el servicio. Se han logrado mantener niveles superiores al 92% en el aprovisionamiento de agua desinfectada.

Cuadro 1. 9
Cobertura de servicios de agua potable a nivel nacional
(millones de habitantes)

Concepto	1995	1996	1997	1998	1999	Variación 1995-1999 %
Cobertura*	76.7	78.7	80.9	88.2	84.3	9.9
Zonas urbanas*	62.0	63.5	65.1	66.1	67.6	9.0
Zonas rurales*	14.7	15.2	15.8	16.1	16.7	13.6
Cobertura % Agua potable	84.2	84.9	85.8	86.4	86.7	3.0

Se recolectan en alcantarillado alrededor de 200 m³/s de aguas residuales urbanas, de las cuales casi 72 m³/s (36% del total recolectado) recibe algún tratamiento antes de su disposición final. De esa cantidad, sólo 29.4 m³/s (14.7% del total recolectado) recibe tratamiento de acuerdo con la normatividad.. Los cuerpos de agua del país aún reciben gran número de descargas de aguas residuales municipales e industriales sin tratamiento, por lo que se requiere incrementar el esfuerzo de inversión en este rubro. El Cuadro 1. 10 presenta la evolución en la incorporación de habitantes al servicio de agua potable y alcantarillado.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Cuadro 1. 10

**Habitantes incorporados a los servicios de agua potable y alcantarillado
(1990–1998)**

Año	Incremento de población total (Millones)	Incremento de habitantes incorporados al servicio	
		Agua potable	Alcantarillado
1990–1991	3.5	3.9	3.6
1991–1992	1.6	2.5	2.2
1992–1993	1.7	2.2	1.9
1993–1994	1.6	2.1	1.9
1994–1995	1.1	2.7	6.6
1995–1996	1.6	2.1	1.5
1996–1997	1.6	2.1	1.1
1997–1998	1.5	1.9	1.1
Periodo 1994–1998	5.8	8.8	10.3

En 1990, la cobertura nacional de agua potable era de 78%; para 1999, este valor se incrementó a 86.7%, lo que representó un aumento de 20.4 millones de habitantes que cuentan con este servicio (Figura 1. 8. Evolución de la cobertura de agua potable a nivel nacional 1990–1999).

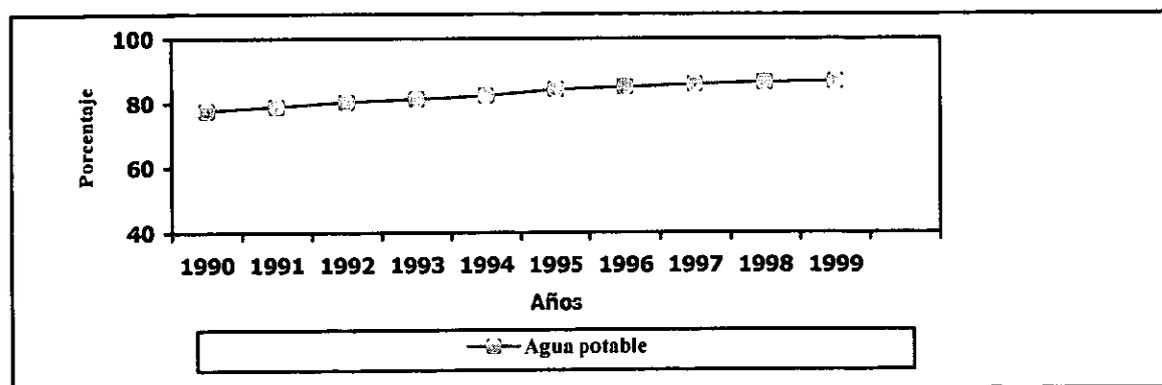


Figura 1. 8. Evolución de la cobertura de agua potable a nivel nacional 1990–1999

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

En 1990 once entidades federativas tenían una cobertura superior a 85%; para 1999 el número se incrementó a 23, en tanto el número de entidades con coberturas inferiores a 70% se redujo de diez a cinco (Figura 1. 9. Cobertura de agua potable por entidad).

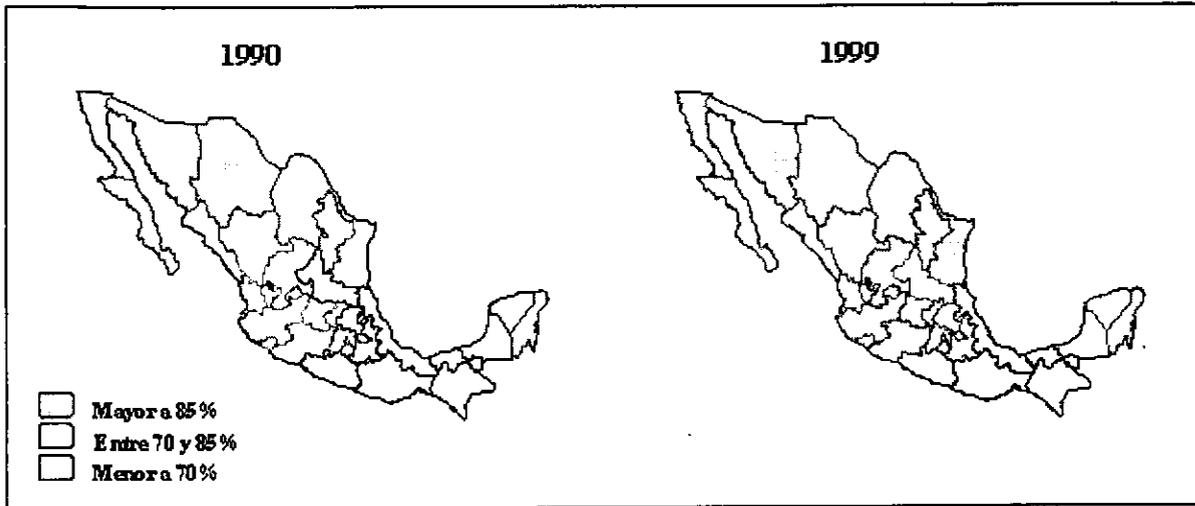


Figura 1. 9. Cobertura de agua potable por entidad

Cabe destacar que aunque se considera que la mayor parte de las entidades federativas tienen una cobertura mayor al 85%, la disponibilidad del vital líquido no necesariamente es del 100%, dado que existe una gran cantidad de comunidades, sobre todo en el norte y noroeste, que aunque cuentan con una toma de agua potable, el servicio se encuentra disponible unas cuantas horas a lo largo del día, lo que significa, que aunque potencialmente se cuenta con una toma que puede abastecer de agua ininterrumpidamente, la realidad muestra que dicho abasto es muy limitado.

En Cuadro 1. 11, muestra la evolución de tomas de agua potable, desglosadas por cada una de las entidades federativas.

Cuadro 1. 11
TOMAS DE AGUA POTABLE SEGUN ENTIDAD FEDERATIVA
1995-1998

ENTIDAD FEDERATIVA	1995	1997	1998
<i>Total</i>	12,690,918	13,703,786	14,071,800
<i>Aguascalientes</i>	186,116	187,622	187,596
<i>Baja California</i>	431,303	499,213	529,329
<i>Baja California Sur</i>	90,440	98,839	103,202

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

<i>Campeche</i>	86,654	92,950	97,596
<i>Coahuila</i>	440,672	478,629	497,816
<i>Colima</i>	132,952	135,940	143,611
<i>Chiapas</i>	193,515	218,081	226,257
<i>Chihuahua</i>	521,633	566,621	589,470
<i>Distrito Federal</i>	1,239,709	1,252,307	1,255,048
<i>Durango</i>	217,159	236,632	240,225
<i>Guanajuato</i>	540,738	591,583	617,147
<i>Guerrero</i>	219,597	233,974	246,591
<i>Hidalgo</i>	183,983	198,526	212,226
<i>Jalisco</i>	983,452	1,112,107	1,144,794
<i>México</i>	2,163,813	2,355,283	2,302,819
<i>Michoacán</i>	451,071	486,356	494,225
<i>Morelos</i>	139,997	158,166	162,431
<i>Nayarit</i>	125,407	134,139	138,168
<i>Nuevo León</i>	759,888	800,623	811,896
<i>Oaxaca</i>	153,760	160,957	162,111
<i>Puebla</i>	385,067	381,695	421,696
<i>Querétaro</i>	210,270	234,848	249,031
<i>Quintana Roo</i>	114,324	129,492	146,837
<i>San Luis Potosí</i>	277,605	300,842	308,802
<i>Sinaloa</i>	485,967	521,189	542,517
<i>Sonora</i>	383,264	423,585	436,608
<i>Tabasco</i>	129,882	140,178	142,361
<i>Tamaulipas</i>	487,531	538,563	560,169
<i>Tlaxcala</i>	60,120	77,399	80,252
<i>Veracruz</i>	515,733	542,619	584,824
<i>Yucatán</i>	242,676	265,965	279,360
<i>Zacatecas</i>	136,620	148,863	156,785

FUENTE: CNA. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 1995, 1997 y 1998.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

En el país existen 372 plantas potabilizadoras, de las cuales funcionan 295 con un gasto conjunto de operación de 77 m³/s. Esto representa 18% del volumen de agua que se proporciona para el uso público a nivel nacional.

En relación con el porcentaje de agua desinfectada, el valor se incrementó de 55% en 1990 a 92.6% en 1999 (Figura 1. 10. Evolución de la cobertura de agua desinfectada 1990–1999). La disminución con respecto a la meta establecida obedece a que se efectuó la construcción de nuevos sistemas formales de distribución, por lo que aumentó el universo de cobertura de abastecimiento. El Cuadro 1. 12 muestra el volumen de agua suministrada y desinfectada según entidad federativa

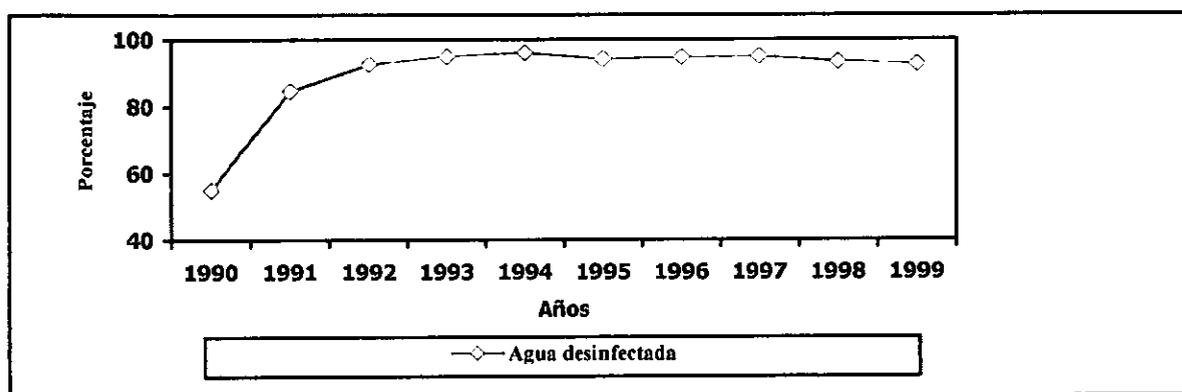


Figura 1. 10. Evolución de la cobertura de agua desinfectada 1990–1999

Cuadro 1. 12

VOLUMEN DE AGUA SUMINISTRADA Y DESINFECTADA

(Litros/segundo)

ENTIDAD FEDERATIVA	1995		1997		1998	
	SUMINIS- TRADA	DESINFEC- TADA	SUMINIS- TRADA	DESINFEC- TADA	SUMINIS- TRADA	DESINFEC- TADA
<i>Total</i>	272,404	256,265	283,631	269,047	294,570	275,220
<i>Aguascalientes</i>	3,858	3,319	3,872	3,507	3,900	3,860
<i>Baja California</i>	7,021	6,962	7,504	7,380	8,590	8,440
<i>Baja California Sur</i>	1,996	1,891	1,998	1,922	2,000	1,920
<i>Campeche</i>	1,326	1,326	1,341	1,341	1,540	1,540
<i>Coahuila</i>	6,150	5,897	6,400	5,900	6,400	5,900
<i>Colima</i>	2,365	2,060	2,593	2,519	2,590	2,530

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

<i>Chiapas</i>	5,680	5,680	5,938	5,938	5,940	5,940
<i>Chihuahua</i>	12,728	12,325	14,000	13,700	14,000	13,700
<i>Distrito Federal</i>	35,500	35,500	35,500	35,500	35,500	35,500
<i>Durango</i>	3,500	3,150	3,523	3,523	6,000	3,640
<i>Guanajuato</i>	10,200	9,000	10,200	9,570	10,200	9,570
<i>Guerrero</i>	6,777	5,766	6,777	6,777	6,780	6,780
<i>Hidalgo</i>	3,500	3,164	3,500	3,164	3,500	3,160
<i>Jalisco</i>	18,896	17,059	18,900	17,140	18,900	17,140
<i>México</i>	33,390	32,908	36,395	35,994	36,820	36,430
<i>Michoacán</i>	8,293	6,921	8,293	6,272	8,300	6,360
<i>Morelos</i>	4,874	4,542	4,874	4,560	9,290	7,080
<i>Nayarit</i>	2,665	2,645	2,674	2,659	2,670	2,660
<i>Nuevo León</i>	11,380	11,120	11,430	11,190	1,430	11,190
<i>Oaxaca</i>	5,500	5,012	5,500	5,014	5,500	5,010
<i>Puebla</i>	6,223	5,802	6,278	5,847	6,800	5,850
<i>Querétaro</i>	4,497	4,101	5,749	5,365	5,750	5,370
<i>Quintana Roo</i>	2,450	2,450	2,914	2,914	2,910	2,910
<i>San Luis Potosí</i>	5,220	3,215	5,220	4,339	5,220	4,370
<i>Sinaloa</i>	8,926	8,356	9,249	8,673	9,250	8,670
<i>Sonora</i>	12,129	11,023	12,129	11,205	12,130	11,210
<i>Tabasco</i>	4,915	4,872	4,921	4,921	4,960	4,960
<i>Tamaulipas</i>	8,874	8,657	11,110	10,220	11,110	10,220
<i>Tlaxcala</i>	1,795	1,787	1,795	1,721	2,690	1,720
<i>Veracruz</i>	14,476	14,476	14,550	14,540	14,550	14,550
<i>Yucatán</i>	5,981	5,881	6,055	5,955	6,850	6,690
<i>Zacatecas</i>	5,695	5,006	5,749	5,385	5,800	5,390
<i>Región Lagunera</i>	5,624	4,392	6,700	4,392	6,700	4,960

FUENTE: SEMARNAT. Programa Hidráulico 2000.

En coordinación con la Secretaría de Salud y los gobiernos municipales se realizan sistemáticamente operativos preventivos y emergentes de saneamiento básico y desinfección de agua, con acciones que han permitido, entre otros efectos, una considerable reducción del

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

cólera; los casos notificados pasaron de 16,430 en 1995, a sólo nueve en 1999, lo que representa el número más bajo desde su reaparición en México.

Si bien los logros son importantes, es necesario reconocer que se deben intensificar las acciones para dotar de servicios de agua potable y alcantarillado a los habitantes de las comunidades rurales que aún carecen de ellos, a fin de superar las coberturas actuales.

Mediante acciones conjuntas de los tres órdenes de gobierno, se han logrado los resultados que se muestran en el Cuadro 1. 13, que corresponden a zonas rurales.

Cuadro 1. 13
Habitantes con servicio de agua potable y alcantarillado en zonas rurales*
1990-1999

Año	Población total (Millones)	Habitantes con servicio			
		Agua potable	%	Alcantarillado	%
1990	23.7	12.1	51.1	4.7	19.8
1991	24.0	12.7	52.9	5.2	21.7
1992	24.3	13.4	55.1	5.8	23.9
1993	24.7	14.0	56.7	6.4	25.9
1994	24.9	14.6	58.6	6.9	27.7
1995	24.1	14.7	61.0	7.1	29.5
1996	24.6	15.3	62.1	7.5	30.6
1997	25.0	15.8	63.4	7.8	31.3
1998	25.3	16.3	64.4	8.1	32.1
1999	25.6	16.7	65.1	8.4	32.8

* Localidades menores de 2,500 habitantes

Nota: Se actualiza el número de habitantes de acuerdo con los índices de crecimiento del Consejo Nacional de Población.

Fuente: CNA.

La CNA establece que como meta para el año 2000 se pondrá énfasis en disminuir el rezago del medio rural, a la vez que se mantendrá la cobertura de agua potable y alcantarillado en el ámbito urbano. A continuación se presentan los principales proyectos cuya realización se programó para el año 2000.

Baja California (Segunda etapa). *Iniciará la construcción de las plantas potabilizadoras Xochimilco y Nacionalista (Mexicali), así como 15 redes de agua potable en Tijuana-Rosarito, en coordinación con el gobierno del Estado.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Tamaulipas (Sustitución de fuentes de abastecimiento). Se llevarán a cabo acciones tendentes a enfrentar la sequía presentada durante los últimos años y a garantizar el abasto a la población, por medio de tomas del río Bravo y acueductos.

Chihuahua (Restitución de fuentes abastecimiento). Se continuará la construcción de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable subterránea, para garantizar la calidad del suministro a las poblaciones afectadas por problemas de contaminación en el estado de Chihuahua.

Nayarit–Tepic (Acueducto Norte). Se corregirá el déficit de agua que se presenta en la ciudad de Tepic, debido al abatimiento local del acuífero del Valle de Matatipac durante el periodo de estiaje, mediante un esquema de participación concertado entre el gobierno del estado y la federación.

Cuauhtémoc, Colima (Colector pluvial). Se llevará a cabo la construcción de cuatro colectores pluviales, con una longitud total de 3.0 km, con el propósito de evitar inundaciones ocasionadas por las lluvias en la ciudad de Cuauhtémoc.

Michoacán (Plantas de tratamiento). Se construirán cinco cajas de conexión de colectores, así como el colector López Mateos, en Morelia. Iniciaré la construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales Jacona y concluirán las plantas de Yurécuaro y Pátzcuaro.

Para el año 2000 se estima la construcción y rehabilitación de 230 sistemas de agua potable (en beneficio de 289,455 habitantes) y la construcción y rehabilitación de 65 sistemas de alcantarillado (en beneficio de 70 mil habitantes). Se contempla, también, la construcción de 2,100 sanitarios rurales (en beneficio de 10,500 habitantes).

ADMINISTRACIÓN DEL AGUA

Para conciliar los requerimientos asociados a la conceptualización del nuevo federalismo con la necesidad de administrar el recurso sobre bases hidrológicas se llevó a cabo una nueva regionalización de la CNA (con bases estrictamente hidrológicas) para desconcentrar racionalmente las funciones reservadas a la Federación y poder introducir nuevos esquemas de financiamiento. Para efectos de lo anterior, de forma preliminar se propone la división del país en 13 regiones como se indica en la Figura 1. 11. Regionalización para uso y administración de agua Esta nueva regionalización corresponde a criterios hidrológicos por lo que facilita la creación de organismos de cuenca que, de manera independiente y conociendo las necesidades específicas de la región, puedan instrumentar proyectos que se ajusten de forma directa a las características locales. De acuerdo a lo anterior, se cuenta con las siguientes regiones:

- | | | |
|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| I. Península de Baja California | VI. Río Bravo | XI. Frontera Sur |
| II. Noroeste | VII. Cuencas Centrales del Norte | XII. Península de Yucatán |
| III. Pacífico Norte | VIII. Lerma-Santiago-Pacífico | XIII. Valle de México |
| IV. Balsas | IX. Golfo Norte | |
| V. Pacífico Sur | X. Golfo Centro | |

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL



Figura 1. 11. Regionalización para uso y administración de agua

Se ha comprobado que la evaluación de los problemas hidráulicos y su solución se puede llevar a cabo de mejor forma en el ámbito local, por ser los propios usuarios y autoridades locales los que conocen con mayor detalle la problemática y pueden plantear por tanto, con el apoyo técnico correspondiente, las mejores opciones de solución considerando los factores propios de la zona, incluidos en ellos la evolución histórica, idiosincrasia y condiciones climáticas específicas.

La SEMARNAT, por medio de la CNA, lleva a cabo la modernización de la estructura administrativa del sector agua, que incluye:

- *El establecimiento de Consejos de Cuenca como una instancia de concertación y coordinación entre los usuarios y los tres niveles de gobierno.*
- *El impulso al proceso de transferencia hacia las autoridades estatales y municipales y hacia los usuarios, de funciones y programas que se pueden desempeñar más eficientemente en esos niveles.*
- *El establecimiento en los estados de Comisiones Estatales de Agua u organismos equivalentes, que faciliten el proceso de descentralización.*
- *La regionalización de la estructura organizacional de la CNA, con base en el concepto de cuencas hidrológicas.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

Se considera que es factible lograr un uso sustentable del agua si los usuarios, autoridades, instituciones, organizaciones y colegios técnicos que deben intervenir en ello asumen un papel activo.

Se ha comprobado también que un elemento esencial para el éxito de las acciones emprendidas es la continuidad de los programas planteados y el convencimiento pleno por parte de los usuarios de la necesidad y los beneficios de las acciones a desarrollar; por tanto, su participación es fundamental desde la caracterización de la problemática de la zona hasta la ejecución de las acciones para resolverla.

Esta participación en el nuevo esquema de manejo del agua puede dar la continuidad requerida a las acciones planteadas para lograr los objetivos previstos. Las instituciones y los funcionarios cambian, pero los usuarios permanecen.

Los Consejos de Cuenca son la figura jurídica que se establece en la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento para promover la participación de los usuarios y las tres instancias de gobierno en la formulación, seguimiento y actualización de la programación hidráulica de las cuencas del país.

Se han desarrollado también Comisiones de Cuenca y Comités Técnicos de Agua Subterránea (COTAS), ambos con extensiones territoriales menores y subordinados al correspondiente Consejo de Cuenca. La Figura 1. 12, explica la integración de los Consejos de Cuenca.

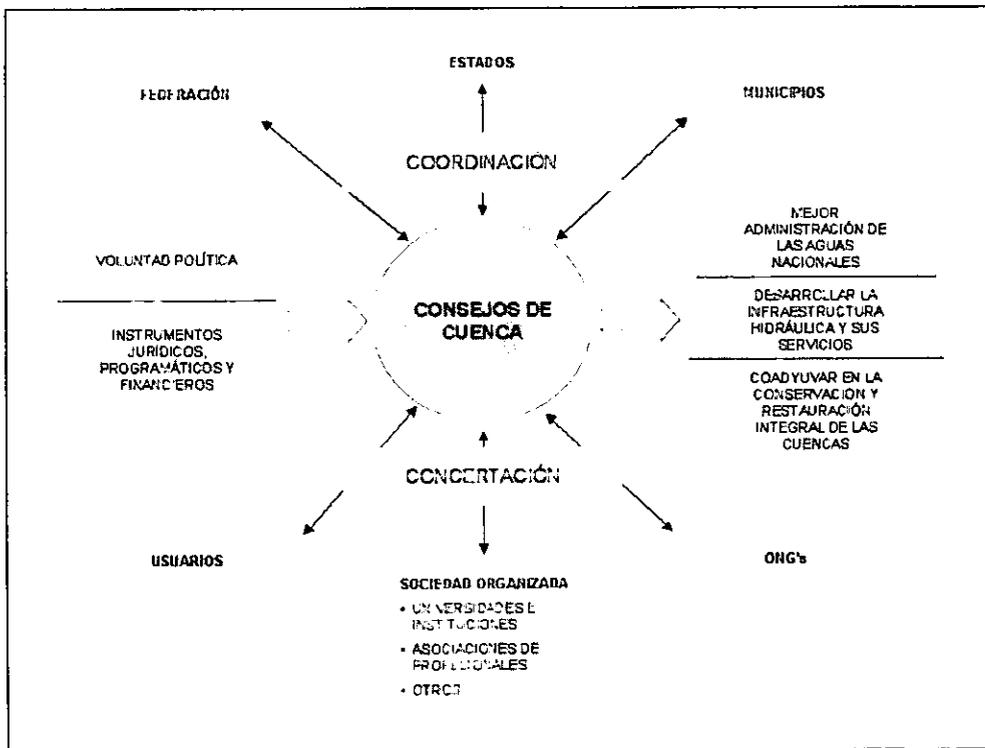


Figura 1. 12.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

En 1999 se lograron importantes avances en el proceso de creación y desarrollo de los Consejos de Cuenca, así como de sus órganos auxiliares, Comisiones de Cuenca y los Comités Técnicos de Aguas Subterráneas. Hasta el mes de diciembre de 1999 (ver Cuadro 1. 14), se habían instalado 16 Consejos de Cuenca en el país; además, se trabaja en el proceso de creación de seis Consejos más, superándose la meta de 11 Consejos programados para 1999. Como órganos de apoyo a los Consejos de Cuenca, se han creado cinco Comisiones de Cuenca y 30 COTAS.

Cuadro 1. 14

Consejos instalados	Fecha de instalación	Avance
Baja California	7 de diciembre de 1999	Cuenta con 10 COTAS.
Alto Noroeste	19 marzo de 1999	El grupo de seguimiento y evaluación acordó integrar una hoja en Internet.
Ríos Mocorito al Quelite	10 de diciembre de 1999	Se instaló la asamblea de usuarios.
Río Fuerte	10 de diciembre de 1999	Se instaló la asamblea de usuarios.
Río Balsas	26 de marzo de 1999	El grupo de seguimiento y evaluación acordó integrar una hoja en Internet.
Costa de Oaxaca	7 de abril de 1999	Se trabajó en una agenda del agua para la cuenca.
Río Bravo	21 de enero de 1999	Se consolidó la comisión del río Conchos.
Nazas-Aguanaval	1 de diciembre de 1998	Se realizan las bases del "Plan de gestión del agua".
Altiplano-San Luis Potosí-Zacatecas	23 de noviembre de 1999	Se organizaron los usuarios por acuífero.
Lerma-Chapala	28 de enero de 1993	Se acordó mantener el vaso con 2 mil Mm ³ y conservar saneada la cuenca.
Río Santiago	16 de junio de 1999	Se encuentra en proceso de consolidación.
San Fernando	26 de agosto de 1999	Se inició el proceso de consolidación.
Río Pánuco	26 de agosto de 1999	Se inició el proceso de consolidación.
Península de Yucatán	14 de diciembre de 1999	Se instaló recientemente.
Valle de México	16 de agosto de 1995	Se validaron los autodiagnósticos de los usuarios.

Para este año se tiene programado realizar la instalación formal de cinco Consejos de Cuenca, en Baja California Sur, río Yaqui-Mátape, río Mayo, río Papaloapan y Costa de Chiapas.

De manera gradual, se ha venido transfiriendo a las autoridades locales y a los usuarios la responsabilidad de construir y operar la infraestructura hidroagrícola en los distritos de riego,

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

así como la infraestructura hidráulica urbana. Además, se han llevado a cabo acciones de consulta y promoción para la constitución de las Comisiones Estatales de Agua.

En 1999 se continuó la transferencia de programas operativos: cuatro correspondientes al subsector hidroagrícola, enmarcados en el esquema de Alianza para el Campo, y cuatro más relacionados con agua potable, alcantarillado y saneamiento.

Se tiene como meta que deberá cumplirse en el año 2000, continuar promoviendo la constitución de comisiones estatales de agua y la promulgación de leyes de aguas en las entidades federativas, para apoyar el proceso de descentralización del país, con los gobiernos de Aguascalientes, Durango, Hidalgo, Oaxaca, San Luis Potosí, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Zacatecas, cuyas propuestas se encuentran en diferentes etapas de análisis, adecuación y aprobación.

La modernización de la estructura organizativa del sector hidráulico busca reordenar las responsabilidades para establecer condiciones que permitan el desarrollo ágil y eficiente de las acciones requeridas.

Tradicionalmente, la CNA ha realizado funciones normativas, financieras, operativas, de construcción y de promoción del desarrollo hidráulico, desde una estructura administrativa conformada de acuerdo con la división política del país.

Actualmente, la CNA evoluciona hacia una estructura cuya función predominante sea de carácter normativo en materia de administración del agua, así como de apoyo técnico especializado a las autoridades locales, para que éstas ejecuten las acciones de tipo operativo, dentro de un esquema de organización por cuencas y regiones hidrológicas. De conformidad con esta orientación general, se ha reorganizado la estructura de la CNA en 13 regiones hidrológico-administrativas, a las cuales se ha desconcentrado funciones y recursos, como la definición y el ejercicio del presupuesto que anteriormente se manejaban desde el nivel central

La CNA regula la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas nacionales, otorgando a los usuarios la autorización para su utilización, establece condiciones a cumplir para no afectar a terceros ni al medio ambiente y vigila que se cumplan los derechos y obligaciones de los usuarios, de acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales y las disposiciones fiscales federales en la materia.

Acorde con sus atribuciones, cuantifica y verifica la disponibilidad y calidad del agua superficial y subterránea y propone políticas de manejo que toman en cuenta las restricciones impuestas por el régimen de renovación del recurso, a fin de preservar su calidad y cantidad.

La Ley Federal de Derechos establece que los usuarios deben pagar una contribución tanto por el uso de las aguas nacionales y sus bienes inherentes, de acuerdo a su consumo y disponibilidad, como por las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores.

En 1996 se estimaba que el universo de usuarios de aguas nacionales era de alrededor de 368 mil. Para promover la regularización administrativa y fiscal de los usuarios, se publicaron

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

decretos presidenciales el 11 de octubre de 1995, que fueron modificados en octubre y diciembre de 1996, otorgando facilidades administrativas y condonando contribuciones fiscales a los usuarios adheridos. Los resultados de estas acciones se han venido consolidando, ya que al 31 de diciembre de 1998, fecha en que culminó la vigencia de los decretos, se logró la adhesión de alrededor de 374 mil usuarios, cifra que rebasa el universo previamente estimado de usuarios. De estos usuarios, 35.1% corresponde al sector agropecuario, 43% a localidades, 3.5% a empresas y 18% a usuarios de zona federal.

Durante 1999, se intensificaron las acciones para regularizar a los usuarios adheridos a los decretos, inscribiendo sus títulos en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA), y con ello otorgándoles la seguridad jurídica en su derecho al uso del agua. A diciembre de 1999 se habían regularizado alrededor de 364 mil usuarios.

Con el fin de preservar la documentación de los usuarios, se modernizaron las instalaciones que resguardan el archivo del REPGA y se avanzó en el proceso de digitalización de expedientes. A los usuarios se les otorgó asesoría personal permanente durante el proceso de regularización, con el apoyo de carteles, trípticos y boletines informativos.

Se iniciaron los trabajos para el desarrollo y actualización de los sistemas para el Registro y Control de los Usuarios de Aguas Nacionales, lo que permitirá contar con un sistema moderno que integre la información administrativa, fiscal y de control de los usuarios del agua.

En cuanto al proceso de desconcentración de la operación del REPGA, durante 1999 se realizaron las labores de planeación, presupuestación y preparación del material para capacitar al personal de las gerencias regionales de la SEMARNAT.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO I. ENTORNO ACTUAL

1.2 LA DESALINIZACIÓN EN EL MUNDO.

LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA COMO UN PROCESO.

El proceso de desalinización se refiere a la remoción de sal del agua. También se le conoce como desalación o desalinación, significando exactamente lo mismo. La desalinización se puede dar de muy diversas formas, pero el resultado siempre será el mismo: agua dulce producida a partir de agua salada o agua marina. Las tecnologías para desalinización pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, sin embargo, el enfoque del presente trabajo va dirigido a la producción de agua potable para propósitos domésticos o municipales.

La habilidad para tratar agua salada para propósitos domésticos y de agricultura, ha sido el sueño del hombre desde hace mucho tiempo. De toda el agua existente en el planeta, un 94% es agua salada y el 6% restante se considera agua dulce, de esta última el 27% se encuentra en glaciares y un 72% se encuentra en el subsuelo. Más de tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por agua salada, y, aunque esta agua es importante para fines de transportación y pesca, es demasiado salada para ser bebida o para la agricultura. Las técnicas de desalinización han incrementado el rango de los recursos naturales hidráulicos disponibles para las comunidades.

Anteriormente, sólo el agua con un contenido menor a los 1000 miligramos por litro de sólidos disueltos, era considerada para ser aprovechada para el suministro doméstico. Esta limitante muchas veces restringió el tamaño y la ubicación de las comunidades, así como endureció la vida de aquellos que no podían vivir cerca de localidades ya establecidas que contaban con agua. La aplicación de las tecnologías de desalinización durante los últimos 50 años, ha cambiado esta tendencia en diversas partes del mundo. Villas, ciudades e industrias han basado su crecimiento en muchas áreas áridas carentes de agua potable, al poder utilizar agua salada.

Este cambio positivo ha sido muy importante en zonas áridas del Medio Oriente, en África del Norte, y en muchas islas del Caribe, donde la carencia de agua dulce ha limitado severamente el desarrollo. En la actualidad, ciudades modernas e industrias importantes se han desarrollado en muchas de esas áreas gracias a la disponibilidad de agua potable producida por los procesos de desalinización de agua marina.

EL DESARROLLO DE LA DESALINIZACIÓN.

La desalinización es un proceso natural, continuo y parte esencial del ciclo del agua. La lluvia se precipita en el suelo, una vez ahí, escurre hacia el mar, en cuyo paso es utilizada por el hombre para diversos propósitos. En la medida en que escurre, va disolviendo a su paso minerales y otras sustancias, comenzando a volverse salada. Una vez que llega a los océanos u otros cuerpos de agua como el Mar Muerto, una parte de ella se evapora debido a la energía solar. En esta evaporación, el agua deja atrás las sales y minerales y forma nubes, que a su vez se convertirán en lluvia, continuando el ciclo.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

2 CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

2.1 ANTECEDENTES.

En una época en que para muchas poblaciones la escasez de agua se ha convertido en grave y creciente problema, no está de más, que se preste atención a uno de los recursos del océano que, en principio, puede parecer el más importante: el agua misma.

En este caso no vamos a considerar mares y océanos como medio en el que viven los peces, ni como almacén de materiales disueltos, tampoco como receptáculo de desechos o vía de transporte, sino como fuente potencial de agua potable, agua indispensable para el mantenimiento de la vida, de la salud y de las actividades productivas.

Las reservas hidráulicas del planeta son principalmente aguas saladas, el Cuadro 2. 1 detalla la distribución del vital líquido en el planeta

Cuadro 2. 1
Distribución del agua en el planeta.

	Volumen (miles de Km ³)	% del Volumen Total
Mares y Océanos	1,370,323	93.93
Glaciares	24,000	1.65
Lagos y Ríos	231	0.0161
Aguas Subterráneas	60,000	4.12
Humedad del Suelo	83	0.005
Vapor Atmosférico	14	0.001
Total	1,454,651	100

El agua cubre las tres cuartas partes de la superficie de la Tierra, pero aproximadamente el 94 por ciento son aguas saladas, el 6 por ciento restante es agua de la superficie terrestre, incluyendo en ella las aguas subterráneas y un volumen nada despreciable (1.65 por ciento) de agua en forma de hielo, adicionalmente existe agua proveniente de la humedad del suelo y en vapor atmosférico. El agua dulce que tan importante papel tiene en la vida y en la economía humana, constituye por consiguiente, una porción insignificante de la hidrósfera, sólo el 0.3 por ciento, y además se encuentra desigualmente repartida.

Se estima que una persona para cubrir sus necesidades biológicas, necesita de 1 a 2 litros de agua al día, y para mantener un nivel de vida aceptable, hacen falta de 20 a 50 litros diarios por

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

persona. Pero el consumo diario es mucho mayor (entre 200 y 400 litros) ya que el agua, además de satisfacer las necesidades personales de bebida, comida e higiene es indispensable para el desarrollo de la agricultura, de la industria y de determinados servicios, constituyéndose por tanto en totalmente esencial para el mantenimiento de las actividades económicas.

Un estadounidense gasta más de 2,500 litros al día y se prevé que esa cifra crecerá considerablemente en los próximos años; una persona que vive en una zona rural de un país subdesarrollado consume poco más de 40 litros. Si bien los niveles de consumo son desiguales, una población en ascenso, un empleo creciente del agua en la industria, un mayor uso a mayor nivel de vida, entre otras cosas, hará que cada vez se requiera más agua. Aunque las estadísticas son poco precisas, actualmente el hombre utiliza más de 100 billones de litros de agua dulce al año. Ante el aumento constante de este consumo, la primera y más urgente solución es sin lugar a duda, el que se utilicen mejor los recursos disponibles, que se reduzca el despilfarro, que no se contaminen los ríos ni las aguas subterráneas, que se recupere y recicle el agua ya utilizada y pueda volver a emplearse. Pero en un segundo plano, aparece la posibilidad de aumentar la cantidad de agua dulce y, en este sentido el océano puede aportar una enorme cantidad.

Es indudable que los océanos y mares ofrecen al hombre toda el agua que se pueda desear, pero no es menos cierto que de los recursos del océano, el agua misma es uno de los que ha resultado más difícil de explotar de forma económicamente rentable. Las características del agua del mar, en particular su salinidad, confieren a ésta una peculiaridad que está en la base del problema. Mientras que el agua de mar posee 35,000 partes por millón de sales disueltas, el agua que es considerada como dulce deberá de contener una cantidad inferior a las 1,000 partes por millón. El servicio de Salubridad Pública de la Unión Americana, señala que el agua para beber deberá de tener no más de 1,000 partes por millón de sales, y preferiblemente, menos de 500; la destinada al riego agrícola no debe superar las 1,200. Para algunos usos industriales puede incluso utilizarse agua marina, pero, por ejemplo, las calderas de alta presión necesitan que el agua no tenga un contenido de sales superior a 2 ó 3 partes por millón.

Pero el agua salada no sólo se encuentra en mares y océanos; existen diversas regiones en el planeta, donde el agua del subsuelo tiene un alto contenido de sales. En ciertas circunstancias, donde ha ocurrido una sobreexplotación de los mantos subterráneos (tal es el caso de una buena porción de los acuíferos del norte, noroeste y centro de la República Mexicana) y que originalmente existía agua dulce, ahora existe agua salada, como consecuencia de algunos fenómenos. Tal es el caso de la intrusión marina, donde por filtración debida a la diferencia de cargas hidráulicas, el agua del mar se adentra en los territorios continentales.

La clasificación más común de las aguas saladas de acuerdo a la cantidad total de sólidos disueltos establece

>35,000 mg/L	-----Salmuera
≈35,000 mg/L	-----Agua de Mar
1,000-35,000 mg/L	-----Agua Salobre
<1,000 mg/L	-----Agua Dulce

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Aunque el grado de sales disueltas puede variar según el destino del agua, en cualquier caso será necesario transformar agua salada en agua dulce. Esto es posible y no se trata de un hecho nuevo, aunque en los últimos años hayan mejorado de forma considerable los métodos y hayan proliferado nuevas técnicas. El reto consiste en hacer rentables dichos procesos, es decir, en conseguir agua dulce a partir del agua de mar a precios asequibles, esto es, a costos que resulten competitivos.

El proceso de desalinización es conocido por todos, bastará con mirar al cielo y observar las nubes; es quizá, el proceso natural más importante en la vida del planeta. Desafortunadamente, dicho proceso no es equitativo y encontramos regiones como la Amazonia donde el agua que se precipita del cielo es abundante, pero que no puede ser aprovechada en su totalidad. En contraparte, existen regiones en el norte de África y en el Medio Oriente donde el agua que se precipita, no llega a satisfacer ni las necesidades más elementales. Países como Arabia Saudita, Omán, Yemen, Marruecos, Túnez, Argelia, Libia y Egipto por ejemplo, cuentan con grandes litorales, sin embargo, toda esa agua en las condiciones naturales no puede ser aprovechada para el consumo doméstico o para la agricultura, dada su gran concentración de sales disueltas.

El caso de México no es la excepción, existen regiones donde continuamente se presentan inundaciones provocadas por las intensas lluvias, dado que no se cuenta con los proyectos de obra civil para contenerlas, o bien, los existentes fueron diseñados con información escasa que no permite contener la mayor parte de las avenidas. De manera contrastada, en los estados del norte y noroeste de la República, la precipitación llega a ser en algunas regiones prácticamente nula, los mantos se encuentran sobreexplotados y la mayor parte de ellos presenta problemas de intrusión marina. Es importante resaltar que en el noroeste se cuenta con grandes extensiones de litoral marino, y que los asentamientos humanos son escasos dada la dificultad de conseguir agua dulce.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los métodos de desalinización han cobrado gran difusión en los últimos 50 años. Su mayor desarrollo se ha dado en la última década, donde los grandes avances en la tecnología de materiales así como el descubrimiento de nuevas sustancias, han logrado abatir de manera considerable los costos de operación y mantenimiento.

2.2 TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN

El hombre en su afán por emular a la naturaleza ha desarrollado diversas técnicas, que de forma directa o aproximada imitan en pequeña escala el ciclo del agua. Dichas técnicas, por su capacidad de producción de agua potable se han dividido en:

- *Procesos Mayores*
- *Procesos Menores*

Los procesos mayores, son aquellos que ya han sido objeto de estudio profundo, y que por tanto, hoy en día tienen la capacidad de generar grandes volúmenes de agua dulce. Las técnicas

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

utilizadas han sufrido mejoras notables en las últimas dos décadas, con lo que se ha logrado una mayor eficiencia en los procesos y consecuentemente, un abatimiento en los costos de operación y mantenimiento. Los procesos mayores por su forma de tratar el agua se han dividido en:

- Procesos Térmicos.
- Procesos de Membrana.

En lo que se refiere a procesos térmicos, su funcionamiento es el que más se asemeja al ciclo del agua. El agua es calentada hasta convertirse en vapor de agua, dejando atrás, todos los sólidos disueltos; este vapor de agua posteriormente es condensado, finalizando el proceso. Aunque en resumen es un proceso muy sencillo, no deberá perderse de vista que consume una gran cantidad de energía, es por ello que se han desarrollado diversos mecanismos y técnicas que aprovechan al máximo la energía liberada. Anteriormente eran los métodos que tenían más capacidad de producción, sin embargo, en la última década gracias a los avances en las tecnologías de materiales, se han desarrollado plantas que utilizan métodos de membrana cuyas capacidades alcanzan a las que tienen las plantas que utilizan procesos térmicos. Los métodos por membrana tienen un funcionamiento que se basa en la filtración del vital líquido a través de membranas. En el pasado eran muy costosos dada la escasa vida útil que tenían las membranas, así como un grado de ineficiencia considerable, sin embargo, las tendencias de hoy apuntan a considerar a estos métodos como los más utilizados en el futuro (ver Figura 2. 1. Capacidad instalada de 1988 a 1997).

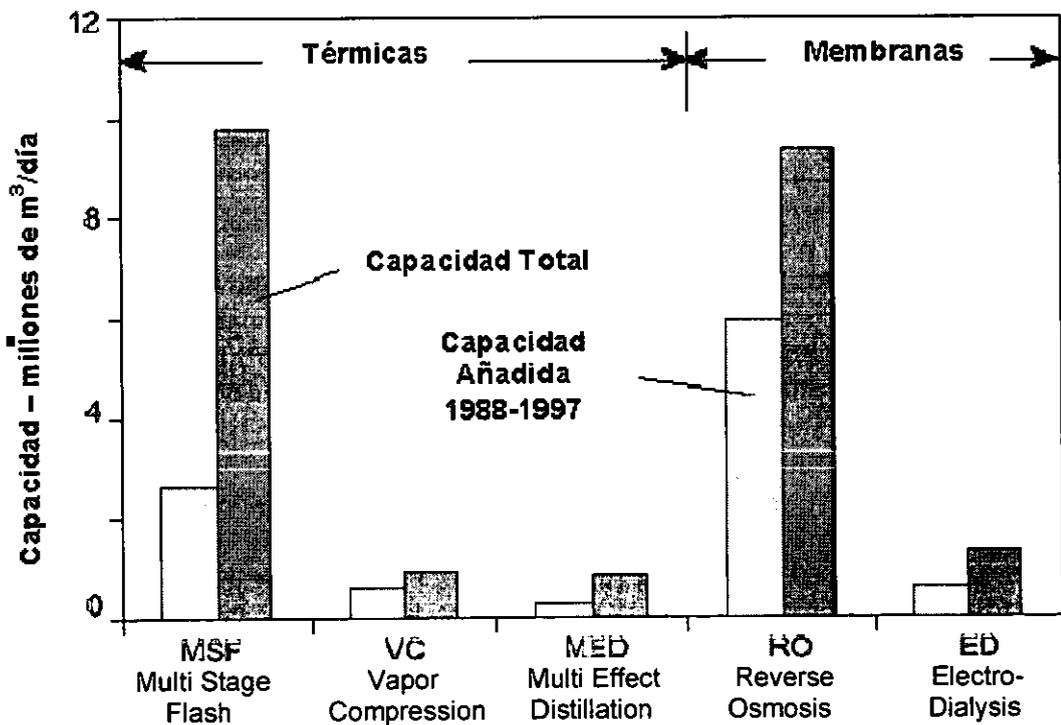


Figura 2. 1. Capacidad instalada de 1988 a 1997

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Además de los procesos mayores, existen otros procesos que con todo rigor tendrían que clasificarse en procesos térmicos y en procesos de membrana, sin embargo, dado su uso y sus capacidades se ha decidido colocarlos en un apartado que en lo sucesivo se denominará procesos menores, entre los que destacan:

- *Congelamiento*
- *Destilación de membrana*
- *Humidificación solar*

Un dispositivo desalinizador en esencia separa el agua salina en dos corrientes: una cuya concentración de sales disueltas es baja (la corriente de agua dulce o fresca), y la otra que contiene las sales disueltas remanentes (la corriente del concentrado o salmuera). Este dispositivo requiere energía para operar y puede usar diversas tecnologías para llevar a cabo esta operación. El presente apartado describe de manera breve los distintos procesos de desalinización comúnmente utilizados para desalinizar agua salina.

2.3 PROCESOS TÉRMICOS

Más del 50 por ciento del agua desalinizada es producida con calor, que destilará agua fresca a partir de agua marina. El proceso de destilación simula el ciclo natural del agua, donde el agua salada es calentada produciendo vapor de agua que es a la vuelta condensado para formar agua dulce. En un laboratorio o planta industrial el agua es calentada hasta su punto de ebullición para producir la mayor cantidad de vapor de agua.

Para que lo anterior pueda llevarse a cabo sin excesivos costos, el punto de ebullición será controlado ajustando la presión atmosférica actuante sobre el agua que está siendo calentada, dado que la temperatura para lograr el punto de ebullición, disminuirá en la medida en que se disminuya la presión atmosférica.

La reducción del punto de ebullición es sumamente importante en el proceso de desalinización por dos razones: ebulliciones múltiples y control de acumulación de minerales en los dispositivos.

Para hervir el agua se requiere de dos condiciones importantes: la adecuada temperatura relativa a la presión ambiental y la suficiente energía de vaporización. Cuando el agua es calentada hasta su punto de ebullición y la fuente de calor es interrumpida, el agua continuará hirviendo por un corto tiempo para después cesar su ebullición, esto es debido a la necesidad de agregar energía adicional (calor de vaporización) para continuar con la ebullición. Una vez que

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

el agua termina de hervir, la ebullición puede volverse a lograr de dos formas: añadiendo más calor, o bien, reduciendo la presión ambiental sobre el agua. Si la presión ambiental es reducida, el agua nuevamente se encontrará en una temperatura mayor que la de ebullición (debido a la reducción en la presión) y hervirá con el calor adicional para brindar el calor de vaporización necesario. Como el calor de vaporización ha sido transferido, la temperatura del agua descenderá hasta su nuevo punto de ebullición.

Para reducir significativamente la cantidad de energía necesaria para la vaporización, el proceso de desalinización por destilación utiliza usualmente ebulliciones múltiples que se darán en recipientes consecutivos, cada uno operando a una presión y a una temperatura menores que la del anterior. Este proceso en el que la presión se reduce para promover la ebullición, puede llevarse al punto en el que la ebullición y el congelamiento se alcancen simultáneamente.

Además de la ebullición múltiple, el otro factor importante es el control de acumulación de minerales. Aunque muchas sustancias se disuelven mejor en agua caliente, otras lo hacen en agua fría. Desafortunadamente muchas de estas sustancias como los carbonatos y sulfatos se encuentran en el agua marina. Una de las más importantes es la que se conoce como Sulfato de Calcio (CaSO_4), misma que comienza a dejar la solución cuando el agua marina alcanza los 95°C . Este material forma escamas muy duras que se alojan en todos los tubos y tanques presentes. La sedimentación de sustancias produce problemas térmicos y mecánicos, y una vez formada, es sumamente difícil su remoción. Una manera de evitar la formación de estas escamas consiste en mantener la temperatura y el punto de ebullición debajo de ese umbral. Otra forma, consiste en agregar sustancias que reduzcan la precipitación de sedimentos y permitan que la temperatura de operación llegue hasta los 110°C .

Estos conceptos han dado lugar a varios métodos exitosos de destilación en diversas localidades del mundo. A continuación se enlistan los procesos catalogados como térmicos, para, posteriormente describir cada uno de ellos con mayor detalle:

- *Destilación por evaporación en etapas múltiples*
- *Destilación por efecto múltiple*
- *Destilación por compresión de vapor*

El proceso que cuenta con la mayor capacidad para desalinizar en la actualidad es la "Destilación por Evaporación en Etapas Múltiples", comúnmente conocido como el proceso MSF (del inglés Multi-Stage Flash), sin embargo, en los últimos años se han inventado técnicas que optimizan en un grado considerable el método conocido como "Destilación por Efecto Múltiple" (en inglés MED, Multiple Effect Distillation), y que probablemente en unos años desplace al conocido como MSF.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

DESTILACIÓN POR EVAPORACIÓN EN ETAPAS MÚLTIPLES

Son mejor conocidas como plantas MSF. Para su mejor entendimiento describiremos su funcionamiento de forma desglosada:

- 1. El agua de mar es calentada en un recipiente denominado calentador de salmuera (brine heater), este proceso de calentamiento se logra en primera instancia haciendo circular vapor de agua, que rodeará a la tubería que trae el agua salada transfiriéndole calor. Este vapor, al hacer dicha transferencia, se condensará y tendrá que ser recirculado y calentado para convertirse nuevamente en vapor y continuar transfiriendo calor al agua salada. Esta es la única parte del proceso, donde existe transferencia de calor de una fuente externa.*
- 2. Una vez que el agua salada ha alcanzado la temperatura de operación será enviada a lo que se conoce como 1era etapa. En esta etapa, la presión ambiental será tal que el agua inmediatamente comenzará a hervir. La introducción repentina del agua caliente dentro de la cámara ocasionará que hierva rápidamente, incluso explotando para convertirse en vapor. El vapor generado por la ebullición es convertido en agua al ser condensado en tubos que interconectan las etapas y que además sirven para transferencia de calor. Dichos tubos son enfriados por el agua entrante que se dirige al calentador de salmuera, lo que a su vez incrementa la temperatura del agua entrante, reduciendo así la energía térmica requerida en el calentador de salmuera para lograr la temperatura de ebullición.*
- 3. El agua salada que no se evaporó, será enviada a la siguiente etapa, donde se repetirá el proceso. La presión en esta etapa deberá ser menor, para así lograr que el agua nuevamente alcance su punto de ebullición. El proceso se repetirá de la misma forma que en la primera etapa, y seguirá repitiéndose subsecuentemente en las demás etapas.*
- 4. Una vez que el agua salada llega a la última etapa, el proceso terminará. El agua que no se evaporó, al llegar a este punto tiene una alta concentración de sales disueltas, esto es lo que se conoce como remanente o salmuera.*
- 5. La diferencia de presiones internas en cada una de las etapas será proporcionada por un condensador que hará un vacío en la última etapa, y que funcionará a partir de la condensación provocada por el agua salada entrante.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

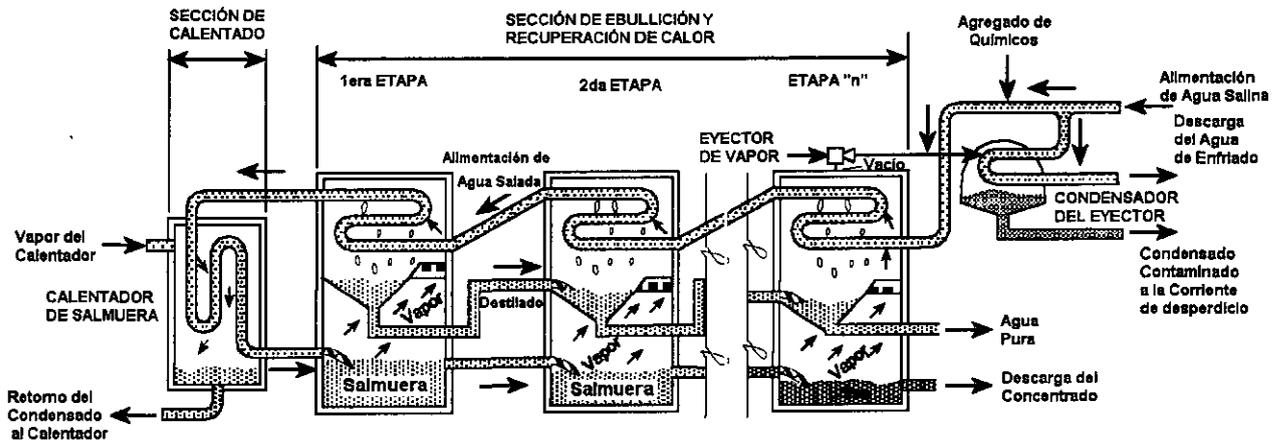


Figura 2. 2. Diagrama de una Planta MSF

La idea de destilar agua, utilizando un vaso que opere bajo condiciones de baja presión, no es nueva, e incluso, ha sido utilizada desde hace más de un siglo. En los años 50, una unidad que constaba de series o etapas pudo desarrollar presiones muy pequeñas. En esta unidad el agua entrante podría pasar de una etapa a otra y hervir en múltiples ocasiones, sin necesidad de añadir más calor. Típicamente una planta MSF contiene desde 4 hasta 40 etapas. (ver Figura 2. 2. Diagrama de una Planta MSF).

Las plantas MSF se han utilizado comercialmente desde los años 50. Generalmente se construyen unidades cuyas capacidades van de los 4000 a los 30,000 metros cúbicos. Este tipo de plantas usualmente operan con temperaturas máximas de 90 a 120° C. Uno de los factores que afectan la eficiencia térmica de la planta, es la diferencia de temperatura existente entre el calentador de salmuera y el condensador en el fin de las etapas. Una planta que opere al límite máximo de temperatura (120° C) tiende a incrementar la eficiencia, pero también se incrementa el potencial de formación de escamas y una acelerada corrosión de las superficies metálicas.

El progreso más significativo que se ha logrado a lo largo de los últimos 10 años es el incremento en la confiabilidad en la operación. Esta confiabilidad se ha logrado a través de mejoras en el control de sedimentaciones, atención diaria a la operación, automatización y controles así como materiales de construcción. Adicionalmente, incrementos en el tamaño de las unidades básicas ha producido ahorros en los costos por acumulación de sedimentos. Diversas naciones en la península arábiga como Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos y Kuwait son altamente dependientes de las plantas MSF para el abastecimiento de agua a sus núcleos urbanos. Esta dependencia, combinada con una enorme capacidad instalada, los ha motivado a tomar medidas para proteger su inversión. Las autoridades en estas naciones han invertido fondos para incrementar el nivel de operación, entrenamiento, y experimentación con métodos y productos químicos antiescamas que generalmente estabilizan la operación de sus plantas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Arabia Saudita, Kuwait y Omán entre otros han construido importantes centros de investigación en sus países para dar soporte a la operación y confiabilidad de sus plantas, así como han dado soporte a la investigación en tecnologías de desalinización a nivel mundial.

DESTILACIÓN POR EFECTO MÚLTIPLE

El proceso de destilación de efecto múltiple (Multiple Effect Distillation, MED) ha sido utilizado para destilación industrial por mucho tiempo. Una de sus aplicaciones más populares es en la evaporación del jugo de la caña de azúcar en la producción de azúcar o la producción de sal con procesos de evaporación. Muchas de las primeras plantas destiladoras de agua utilizaban el proceso MED, pero posteriormente, dicho proceso fue desplazado por el de etapas múltiples, principalmente debido al costo y su aparente mayor eficiencia. Al evolucionar la tecnología, desde la década de los años 80, el interés en el proceso de destilación multiefecto se renovó, y una gran cantidad de diseños innovadores han sido construidos desde entonces. Muchas de las unidades MED han sido construidas en torno al concepto de operación bajo temperaturas reducidas. La Figura 2. 3. Diagrama de una Planta MED, muestra el funcionamiento de estas plantas.

Al igual que el proceso MSF, el proceso de destilación de efecto múltiple tiene lugar en una serie de vasos o recipientes (efectos) y utiliza el principio de reducción de la temperatura ambiente en los diversos efectos. Esto permite que el agua con la que es alimentado, hierva en múltiples ocasiones sin necesidad de agregar calor adicional después del primer efecto. En general, un efecto consiste en un recipiente, un intercambiador de calor, y dispositivos para transportar los diversos líquidos entre los efectos. Una gran cantidad de diseños han sido o están siendo utilizados para el área de intercambio de calor, entre los que destacan tubos verticales con una delgada película de agua salada descendiendo; también existen diseños que incluyen tubos horizontales con una película descendiendo o bien con placas por donde desciende la salmuera. Sin lugar a dudas, el intercambiador de calor más común, consiste en tubos horizontales con una película de agua descendiendo. En los últimos años se han hecho algunos diseños verticales, que, entre otras cosas, permiten la construcción en zonas donde el costo del terreno es alto, dada su poca extensión en planta.

Existen diversos métodos para introducir el agua salada al sistema. El agregar agua en iguales porciones a todos los efectos, es la más común. Sin embargo, todos los procesos MED abarcan las siguientes etapas:

- 1. El agua introducida es atomizada o distribuida de cualquier otra forma para cubrir la superficie del evaporador (usualmente tubos) formando una delgada película que rápidamente promueve la ebullición y evaporación después de que ha sido precalentada en la sección anterior. Las superficies en el primer efecto, son calentadas por vapor que proviene de las turbinas existentes en una planta de generación o bien, en un calentador. El vapor es condensado en la superficie más fría dentro del efecto a calentar. El condensado es reciclado en el calentador para su reutilización. Las superficies de todos los demás efectos, serán calentadas por el vapor producido en el efecto inmediato anterior. El vapor producido en el último efecto es condensado en un intercambiador de calor separado, denominado*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

“condensador final”, que será enfriado por el agua entrante, lo que a su vez, precalentará dicha agua, haciendo más eficiente el proceso.

2. Sólo una porción del agua marina aplicada a las superficies de transferencia de calor es evaporada. El agua restante de cada efecto, más concentrada y denominada salmuera, alimentará el depósito de salmuera del siguiente efecto, donde una pequeña porción se evaporará convirtiéndose en vapor. Este vapor forma también parte del proceso de calentamiento. Todo el vapor condensado dentro de los efectos es la fuente que formará el agua dulce, considerada como producto final.
3. La presión ambiental dentro de los efectos en este proceso, será mantenida por un sistema separado de vacío. La eficiencia térmica del proceso dependerá del número de efectos, que serán de 8 a 16 en una planta típica.

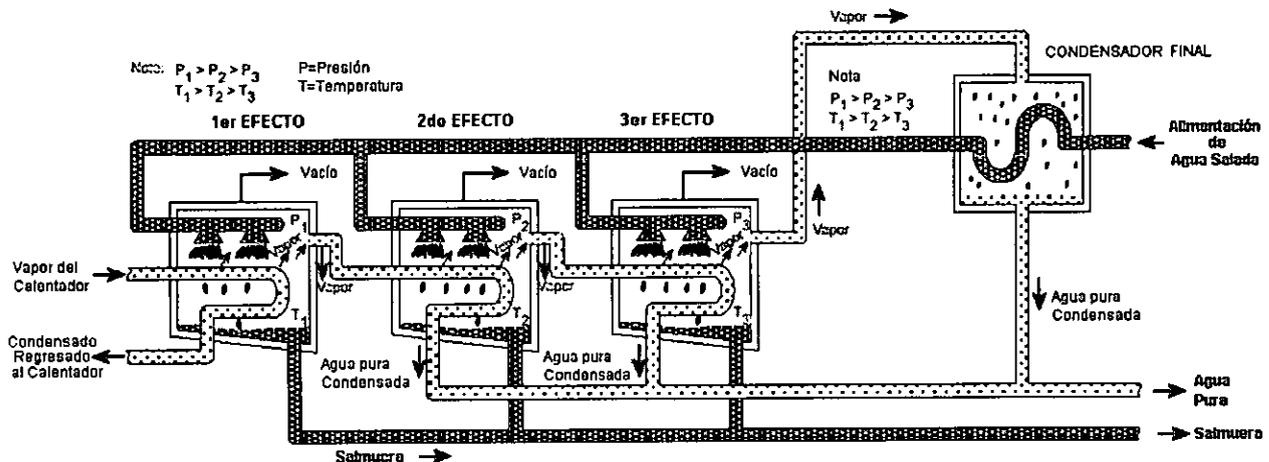


Figura 2. 3. Diagrama de una Planta MED

Las plantas MED son comúnmente construidas en capacidades que van de los 2,000 a los 20,000 metros cúbicos por día. Muchas de las más recientes han sido construidas para operar con una temperatura máxima del primer efecto de 70°C, lo que reduce de manera significativa la formación potencial de escamas dentro de la plantas. Esto a su vez incrementa la necesidad de superficies adicionales para transferencia de calor, lo que incrementará el tamaño de la planta. La mayor parte de las aplicaciones más recientes de este tipo de tecnología, las podemos observar en la India, en las islas del Mar Caribe, en las islas Canarias y en los Emiratos Árabes Unidos. Aunque la capacidad instalada de unidades que utilizan este método, sigue siendo pequeña, su número y popularidad, van aumentando.

Las plantas MED de alta eficiencia requieren un considerable número de efectos, así como grandes superficies de transferencia de calor, por lo que son utilizadas en aquellos casos donde los costos de los energéticos son elevados. En casos donde se dispone de bajos costos de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

energéticos, los costos de inversión en estas plantas se reducen significativamente. En algunas aplicaciones, se añade un ciclo de compresión térmica de vapor lo que reduce considerablemente el número de efectos y la superficie requerida para brindar una capacidad similar.

DESTILACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR

El proceso de destilación por compresión de vapor es generalmente utilizado acompañado de otros procesos (como el descrito en el párrafo anterior) o bien para unidades desalinizadoras de pequeña o mediana escala. El calor para evaporar el agua proviene de la compresión de vapor en lugar del directo intercambio de calor proveniente del vapor producido en el calentador. Las plantas que utilizan este proceso también son diseñadas para aprovechar el principio de la reducción de punto de ebullición a partir de la reducción de la presión. Un compresor mecánico o bien, una turbina de vapor serán los dos métodos primarios utilizados para condensar vapor y producir suficiente calor para evaporar el agua marina entrante. El compresor mecánico usualmente puede funcionar con electricidad o diesel, permitiendo destilar agua a partir exclusivamente de energía eléctrica.

Las unidades de compresión de vapor han sido construidas con una gran variedad de configuraciones para promover el intercambio de calor para evaporar el agua marina. La Figura 2. 4. Diagrama de una Planta VC., ilustra un método simplificado en el cual un compresor mecánico es usado para generar el calor para la evaporación. Todo el vapor es retirado por un compresor mecánico que proviene del último efecto e introducido como calor de vapor dentro del primer efecto, una vez ahí, después de la compresión es condensado en el lado más frío de la superficie de transferencia de calor, que regularmente es un conjunto de tubos. El agua marina es atomizada o distribuida de cualquier otra forma en el exterior del conjunto de tubos, donde hierve y se evapora de manera parcial, produciendo más vapor.

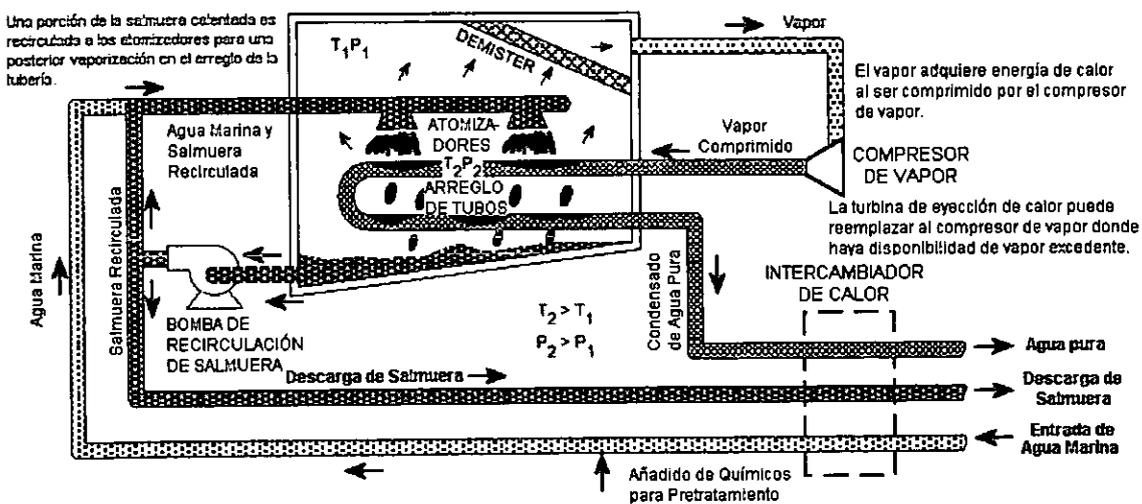


Figura 2. 4. Diagrama de una Planta VC.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Para utilizar compresores de bajo costo, el incremento en la presión es limitado, y consecuentemente, la mayor parte de plantas sólo cuentan con una etapa. En plantas más modernas y grandes, varias etapas están siendo utilizadas. Las unidades mecánicas de compresión de vapor son producidas en capacidades que van de unos pocos litros hasta 3,000 metros cúbicos por día. Éstas, generalmente tienen un consumo de energía de 7 a 12 Kilowatts-hora por metro cúbico.

En el caso de la solución utilizando una turbina de vapor para la unidad de compresión de vapor, también llamada termocompresor, un orificio tipo vénturi en la turbina produce y extrae vapor de agua del vaso principal, creando un ambiente de presión reducida en el vaso principal. El vapor de agua extraído es comprimido por la turbina de vapor. Esta mezcla es condensada en las paredes del tubo para brindar la energía térmica (calor de condensación) para evaporar el agua marina que está en el otro lado de las paredes del tubo en el vaso. Las unidades de este tipo son construidas para producir entre 500 y 20,000 metros cúbicos diarios.

Las unidades de compresión de vapor suelen ser utilizadas para pequeños centros turísticos, industrias y minas, donde el agua dulce no está disponible. Su simplicidad y confiabilidad en la operación las convierte en unidades muy atractivas para pequeñas instalaciones donde se desean las características antes mencionadas.

2.6 PROCESOS DE MEMBRANA

En la naturaleza las membranas juegan un papel muy importante en la separación de las sales. Esto incluye tanto los procesos de diálisis y ósmosis que ocurren en el cuerpo. Las membranas son usadas en dos procesos importantes de desalinización que son: electrodiálisis y ósmosis inversa. Cada proceso utiliza la habilidad que tienen las membranas para diferenciar y selectivamente separar las sales y el agua. Estas membranas son usadas de diversas formas en cada uno de estos procesos.

La electrodiálisis utiliza un potencial eléctrico para mover sales selectivamente a través de una membrana, dejando atrás agua dulce como producto. En el proceso de ósmosis inversa, la presión es utilizada para la separación permitiendo al agua dulce moverse a través de la membrana, dejando las sales atrás (ver Figura 2. 5. Métodos por Membrana).

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

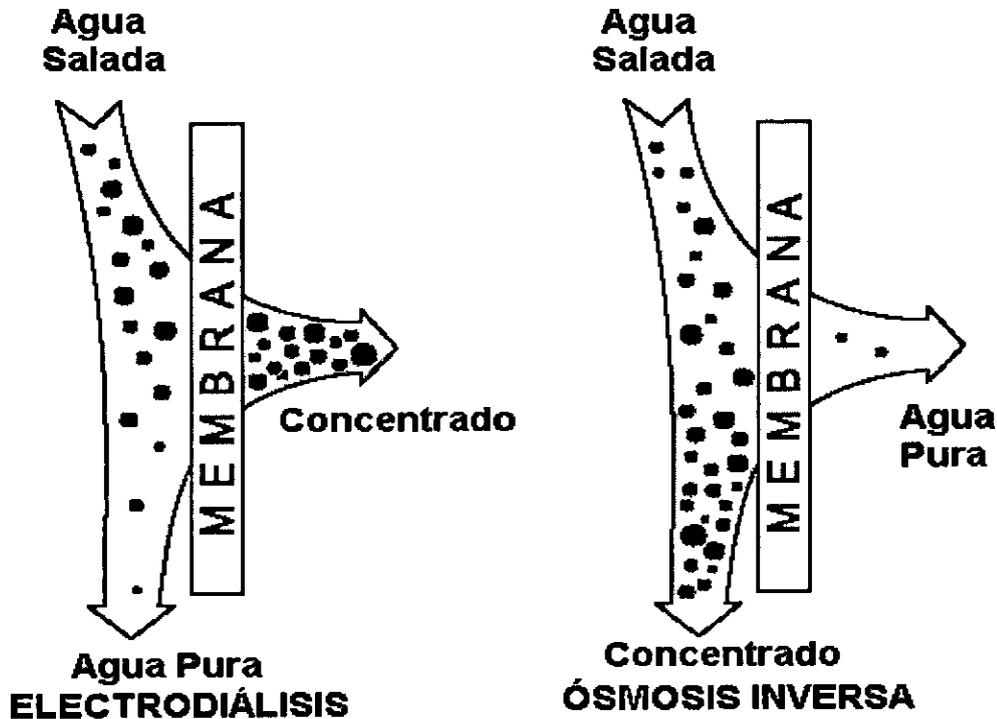


Figura 2. 5. Métodos por Membrana

Ambos conceptos han sido explorados por los científicos desde hace más de un siglo, pero su comercialización para propósitos municipales ha ocurrido solamente en los últimos treinta años.

ELECTRODIÁLISIS

La electrodiálisis fue introducida comercialmente a principio de los años 60, aproximadamente 10 años antes que la ósmosis inversa. El desarrollo de la electrodiálisis brindó una manera relativamente económica para desalinizar agua subterránea y despertó interés considerable en el estudio de las tecnologías de desalinización para producir agua potable para uso municipal.

El proceso de electrodiálisis depende de los siguientes principios:

- *La mayor parte de las sales disueltas en agua son iónicas, pudiendo ser positiva (catiónicas) o negativamente (aniónicas) cargadas.*
- *Estos iones son atraídos a electrodos cuya carga es opuesta.*
- *Las membranas pueden ser construidas para permitir el paso selectivo tanto de aniones como de cationes.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Los constituyentes iónicos disueltos en una solución salina como el sodio (+), cloro (-), calcio (++) , y carbonatos (--) están dispersos en agua, neutralizando de manera efectiva sus cargas individuales. Cuando los electrodos conectados a la fuente externa de una corriente directa como una batería son colocados en el contenedor del agua salina, una corriente eléctrica viaja a través de la solución, con los iones tendiendo a migrar al electrodo con carga opuesta.

Para desalinizar agua por medio de este fenómeno, las membranas que permitirán tanto a los cationes como a los aniones (pero no ambos) pasar, tendrá que ser colocado en medio un par de electrodos. Estas membranas forman arreglos alternados con una membrana selectiva de aniones, seguida de una membrana selectiva de cationes. Una hoja espaciadora que permite que el agua fluya a lo largo de la superficie de la membrana será colocada entre cada par de membranas.

Un espaciador da lugar al canal que lleva el agua producto, mientras que el siguiente lleva la salmuera. Como los electrodos están cargados y el agua salina fluye a lo largo del espaciador del agua producto en ángulos rectos a los electrodos, los aniones en el agua son atraídos y llevados hacia el electrodo positivo. Lo anterior diluye el contenido salino del agua en el canal del agua producto. Los aniones (como sodio o calcio) pasan a través de la membrana selectiva de aniones, pero no pueden pasar más allá de la membrana selectiva de cationes, que bloquea su camino y atrapa al anión en la salmuera. De manera similar, los cationes que se encuentran bajo la influencia del electrodo negativo se mueven en la dirección opuesta a través de la membrana selectiva de cationes al canal por donde fluye el concentrado en el otro lado. Aquí, los cationes son atrapados porque la siguiente membrana es selectiva de aniones y previene futuros movimientos hacia el electrodo.

Por medio de este arreglo, el concentrado y las soluciones diluidas son generadas en los espacios entre las membranas alternas. Estos espacios, delimitados por dos membranas (una aniónica y la otra catiónica) son denominados celdas. Un par de celdas consiste en dos celdas, una con los iones migrados (la celda de dilución del agua producto) y la otra con el concentrado de los iones (la celda de concentrado para la corriente de salmuera).

Una unidad básica de electrodiálisis consiste en varios cientos de pares de celdas, delimitados entre sí con electrodos en el exterior, a ello se le llama arreglo de membranas. El agua de entrada pasa simultáneamente en caminos paralelos a través de todas las celdas para brindar un flujo continuo de agua desalinizada y salmuera para emerger del arreglo de membranas (ver . Desalinización por Electrodiálisis).

Dependiendo del diseño del sistema, productos químicos pueden ser añadidos en las corrientes del arreglo, para reducir la potencial formación de sedimentos o escamas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

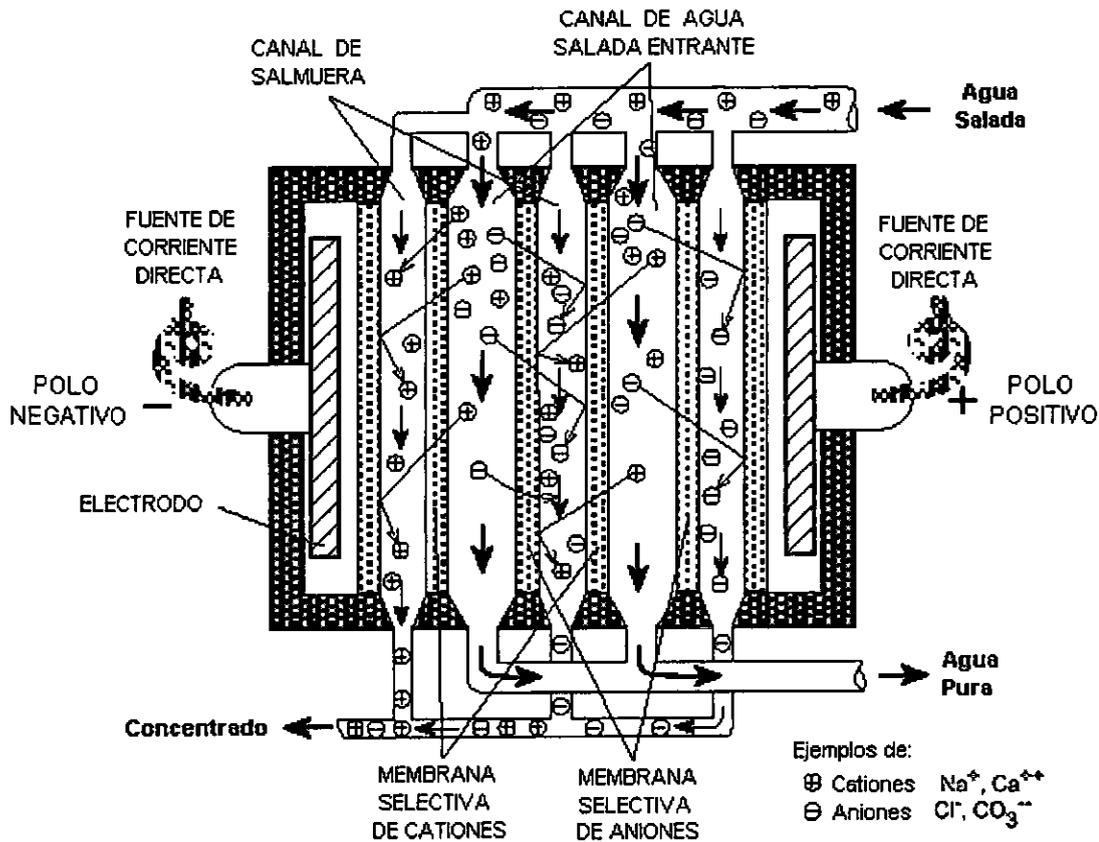


Figura 2. 6. Desalinización por Electrodiálisis

Una unidad de electrodiálisis está compuesta de los siguientes elementos:

- Tren de pretratamiento
- Arreglo de membranas
- Bomba de circulación de baja presión
- Fuente de poder de corriente directa (un rectificador)
- Post-tratamiento

El agua proveniente del pozo salino deberá ser pretratada para eliminar materiales que pudieran dañar las membranas o bloquear los canales delgados en las celdas en la entrada del arreglo de membranas. El agua entrante es circulada a través del arreglo como una bomba de baja presión con suficiente potencia para vencer la resistencia del agua haciéndola pasar a través de los pasajes estrechos. Un rectificador se utiliza para transformar la corriente alterna en directa que deberá de ser suministrada a los electrodos en el exterior del arreglo de las membranas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

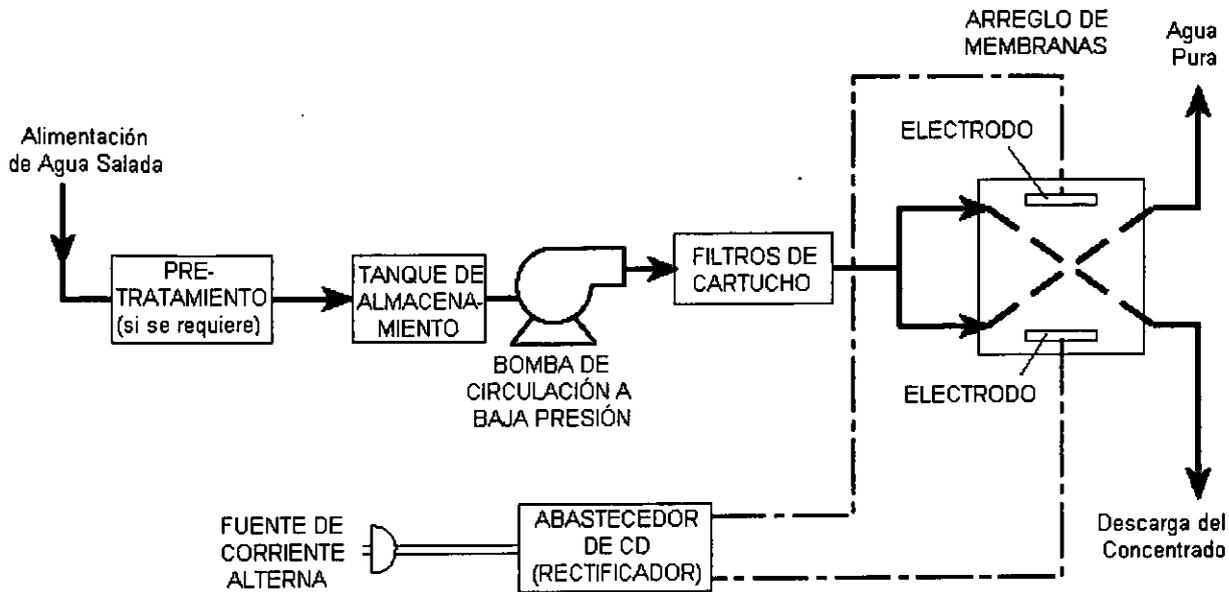


Figura 2. 7. Diagrama de una Planta ED

Un tratamiento posterior consiste en estabilizar el agua y prepararla para la distribución. Este post-tratamiento puede consistir en la remoción de gases y ajustar el PH (ver Figura 2. 7. Diagrama de una Planta ED).

Proceso de Electrodiálisis Inversa (EDR)

A principios de los años 70, una compañía americana introdujo comercialmente el proceso EDR para desalinizar. Una unidad EDR opera de acuerdo al mismo principio general que la electrodiálisis común excepto que tanto los canales del producto y la salmuera son idénticos en construcción. A intervalos durante varias veces en una hora, la polaridad de los electrodos se invierte, y los flujos son cambiados simultáneamente tal que el canal de la salmuera se convierte en el canal de agua procesada y el canal de agua procesada se convierte en el canal de la salmuera.

El resultado es tal que los iones son atraídos en la dirección opuesta a través del arreglo de las membranas. Inmediatamente después se invierte la polaridad y el flujo, lo suficiente para que el agua procesada se deslice hasta que el arreglo de membranas y las líneas sean vaciadas, y la calidad de agua es restaurada. Dicho flujo toma cerca de 1 ó 2 minutos, y entonces la unidad puede continuar produciendo agua. El proceso inverso es útil para desintegrar y desalojar los

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

sedimentos en las celdas antes de que puedan asentarse y presentar problemas. El flujo permite a la unidad operar con una pequeña porción de químicos y minimiza el ensuciamiento de la membrana.

Aplicación

La electrodiálisis tiene las siguientes características y aplicaciones:

- *Capacidad de alta recuperación (más producto y menos salmuera)*
- *La energía utilizada es proporcional a la remoción de sales*
- *La habilidad de tratar agua con un nivel más alto de sólidos suspendidos que el proceso de ósmosis inversa*
- *Carencia de efectos en sustancias no iónicas como el silicio*
- *Bajo uso de sustancias químicas para el pretratamiento*

Las unidades de electrodiálisis son normalmente utilizadas para desalinizar aguas del subsuelo. El mayor requerimiento de energía es el consumido por la corriente directa utilizada para separar las sustancias iónicas en el arreglo de membranas.

ÓSMOSIS INVERSA

Con relación a los procesos de destilación y de electrodiálisis, la ósmosis inversa es relativamente nueva, su comercialización exitosa ocurrió a principios de los años 70.

El proceso de ósmosis inversa es un proceso de separación a través de una membrana en el que el agua, a partir de una solución salina presurizada, es separada de los materiales disueltos fluyendo a través de dicha membrana. No se requiere calor y cambio de polaridad en este proceso de separación. La mayor parte de energía requerida para desalinizar es para presurizar la solución salina entrante.

En la práctica, el agua salina es bombeada hacia un vaso cerrado que será presurizado contra la membrana. Como una porción del agua pasa a través de la membrana, el resto del agua entrante sufre un incremento en su concentración de sales. Al mismo tiempo, una porción de esta agua entrante es descargada sin pasar a través de la membrana.

Sin esta descarga controlada, el agua entrante presurizada continuaría incrementando la concentración salina, creando problemas tales como precipitación o sobresaturación de sales, incrementando la presión osmótica en toda el área de la membrana. La cantidad de agua entrante que deberá ser descargada varía de un 20 a un 70 por ciento del flujo entrante, dependiendo de la cantidad de sal contenida en la alimentación.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Un sistema de ósmosis inversa se compone de lo siguiente:

- *Pretratamiento*
- *Bomba de alta presión*
- *Ensamble de membranas*
- *Post-tratamiento*

El pretratamiento es importante en el proceso de ósmosis inversa debido a que el agua entrante debe de pasar por pasajes muy estrechos a lo largo del proceso. Por consecuencia, los sólidos suspendidos deberán ser removidos y el agua pretratada no deberá tener precipitación de sal o crecimiento de microorganismos que pudieran afectar a la membrana. Regularmente, el pretratamiento consiste en filtración fina además de añadir ácido u otro químico para inhibir la precipitación.

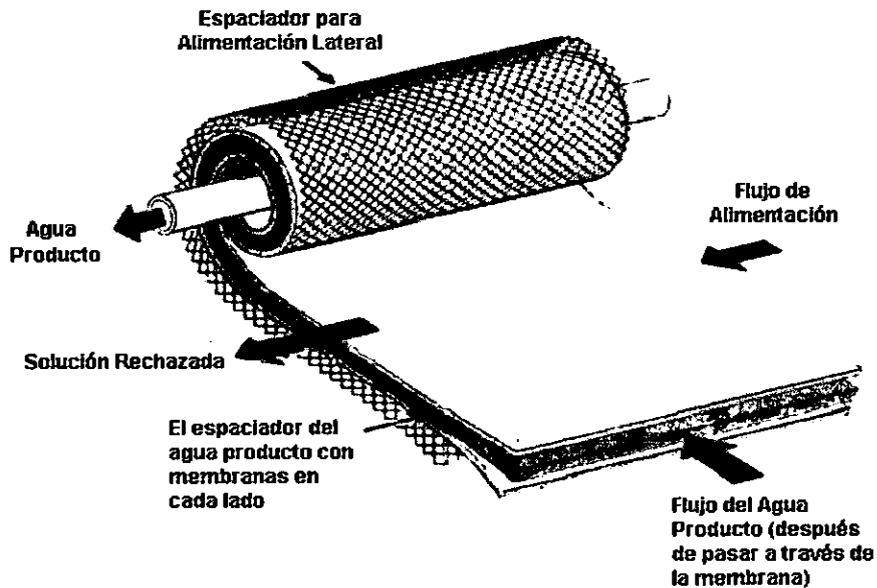
La bomba de alta presión brinda la presión necesaria para permitir que el agua pase a través de la membrana y mantenga a las sales en el lado anterior. Estos rangos de presión van de los 15 a los 25 bares para agua de pozos y de 54 a 80 bares para agua marina.

El ensamble de membranas consiste en un vaso presurizado y una membrana que permite al agua entrante hacer presión hacia la membrana. La membrana deberá tener la capacidad de soportar dicha presión en toda su área. Las membranas semipermeables son frágiles y varían en sus capacidades de pasar agua dulce y restringir el paso de sales. No hay membrana perfecta en su habilidad para retener sales, por lo que, una pequeña porción de sales pasará a través de la membrana y aparecerá en el agua procesada.

Las membranas que se utilizan en los procesos de ósmosis inversa están hechas en una amplia variedad de configuraciones, dos de las más comercialmente exitosas son en hoja en forma de espiral -spiral-wound- (ver Figura 2. 8. Ensamble y corte de una membrana de hoja en espiral) y las de fibra hueca -hollow fiber- (ver Figura 2. 9. Ensamble de Membrana de Fibra Hueca). Ambas configuraciones son usadas para desalinizar tanto agua salobre de pozos como agua marina, aunque la construcción de la membrana y la presión en el vaso dependerán del fabricante y de la sal contenida en el agua entrante.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN



Construcción del Elemento de Membrana en Espiral

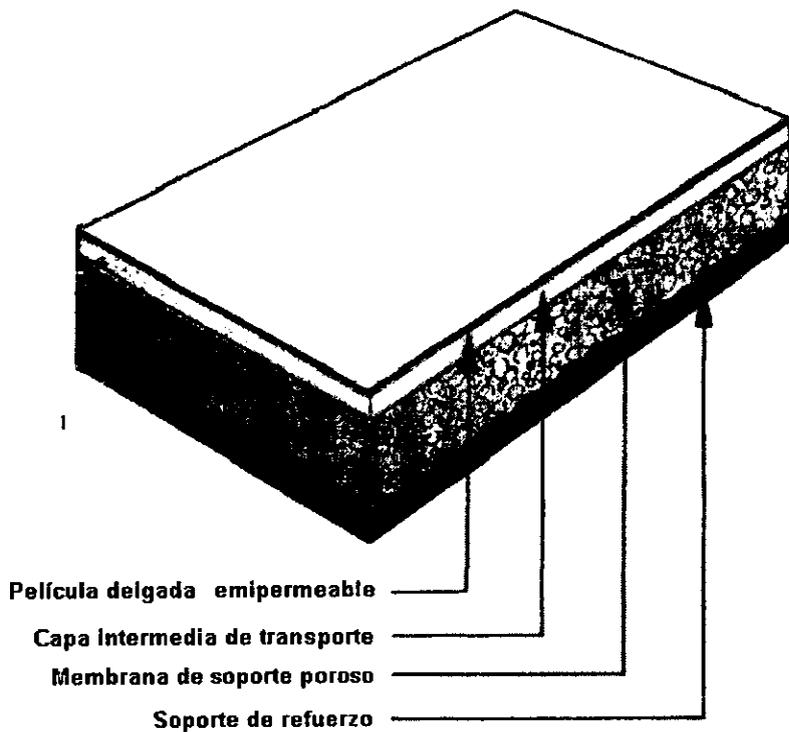


Figura 2. 8. Ensamble y corte de una membrana de hoja en espiral

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

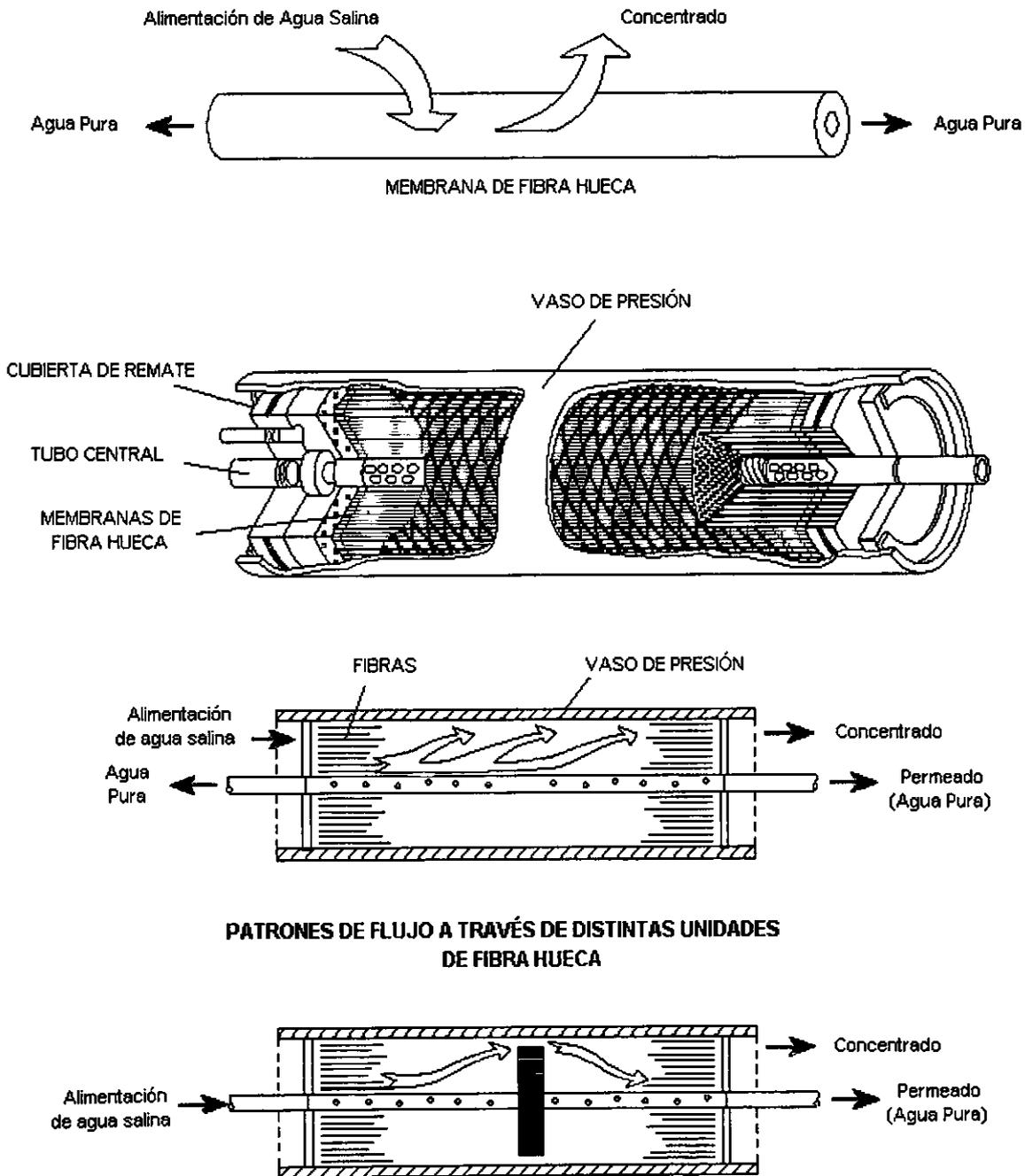


Figura 2. 9. Ensamble de Membrana de Fibra Hueca

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Los procesos de post-tratamiento consisten en estabilizar el agua y prepararla para distribución. Este post-tratamiento puede consistir en la remoción de gases tales como el sulfuro de hidrógeno así como el ajuste del PH La Figura 2. 10. Diagrama de una planta de ósmosis inversa muestra el funcionamiento.

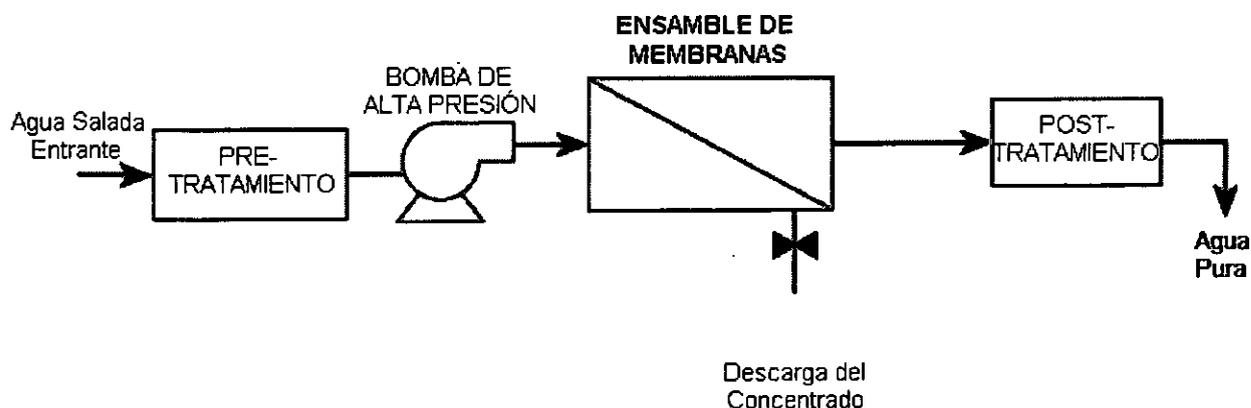


Figura 2. 10. Diagrama de una planta de ósmosis inversa

Dos desarrollos han ayudado a reducir los costos de operación de las plantas de ósmosis inversa a lo largo de los años 80: el desarrollo de membranas que pueden operar eficientemente con presiones reducidas y el uso de dispositivos de recuperación de energía. Las membranas en la actualidad cuentan con mayor capacidad de flujo de agua (cantidad de agua que fluye por unidad de área), mejoras en el rechazo de sales, precios más bajos y mayor vida útil. Las membranas de baja presión han sido ampliamente utilizadas para desalinizar aguas de pozos. Los dispositivos de recuperación de energía son conectados a la corriente del concentrado, conforme se van alejando del vaso presurizado. El agua en la corriente del concentrado pierde entre 1 y 4 bares, en relación de la presión aplicada a partir de la bomba de alta presión. Estos dispositivos de recuperación consisten en mecanismos que generalmente son turbinas o bombas de cierto tipo que pueden convertir una caída de presión en energía de rotación. Estos dispositivos pueden generar un impacto significativo en la economía de plantas grandes. En la actualidad el consumo de energía que se ha detectado en plantas desalinizadoras de agua marina por ósmosis inversa, está cercano a los 3 Kilowatts-hora por metro cúbico

Otro evento importante que ha ocurrido en el desarrollo de estas membranas, ha sido el uso de membranas llamadas de nanofiltración (NF), que son más porosas para el paso de sólidos disueltos. Estos procesos son utilizados para remover la mayor parte de los iones bivalentes (e.g. Ca^{+2} y Mg^{+2}). El rechazo de los iones monovalentes por parte de las membranas NF como el Cl es mucho menor que en el caso de las membranas de ósmosis inversa tradicionales. Las membranas NF son usadas siempre y cuando el agua entrante es esencialmente dulce, aunque

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

contiene algunos sólidos disueltos que causan dureza. Aunque el uso de las membranas NF para suavizar el agua se puede considerar un proceso de desalinización, habría que definir lo que es considerado como un proceso de este tipo.

Sin embargo, el desarrollo y uso de las membranas de nanofiltración registra un incremento fuera del ámbito de la ósmosis inversa. Los procesos que utilizan membranas NF han revolucionado la industria de suavización del agua, y se están moviendo hacia un proceso basado en membranas que tendrá su propio nicho dentro del tratamiento de aguas. El agua suavizada previamente por procesos de nanofiltración puede utilizarse para alimentar plantas de destilación y procesos de ósmosis inversa, ofreciendo la potencial mejora en los costos de desalinización. Esto a su vez, ha generado un futuro interés en todos los tipos de membranas para el tratamiento de agua potable.

Los últimos diez años han sido muy significativos para el proceso de ósmosis inversa. Aunque el proceso no ha cambiado fundamentalmente en su concepto, se han conseguido continuas mejoras en la eficiencia de las membranas, así como en la recuperación de energía, en la reducción en el uso de energía, en la vida útil de las membranas, en el control de operación y en la experiencia en cuanto al uso. El resultado ha sido una reducción en el costo total del agua producida por los procesos de ósmosis inversa, especialmente en lo relacionado a desalinización de agua marina.

2.5 PROCESOS MENORES

Algunos otros procesos han sido utilizados para desalinizar agua. Estos procesos no han logrado el suficiente éxito comercial que tienen los procesos de destilación, electrodiálisis y ósmosis inversa. Pero pueden resultar costeables bajo circunstancias especiales o bien con tecnologías que surjan en el futuro. Los procesos más significativos son congelamiento, destilación por membrana y humidificación solar.

CONGELAMIENTO

Se hizo trabajo muy extenso en los años 50 y 60 para desarrollar procesos de desalinización por congelamiento. A lo largo del proceso de congelamiento, las sales disueltas son excluidas de manera natural al formarse los cristales de hielo. El agua marina puede ser desalinizada enfriando el agua hasta formar cristales bajo condiciones controladas. Antes que la totalidad de la masa de agua ha sido congelada, la mezcla es usualmente lavada y enjuagada para remover las sales del agua remanente o que se adhieran cristales de hielo. El hielo es entonces fundido para producir agua dulce.

Teóricamente, el congelamiento tiene muchas ventajas sobre la destilación, que ha sido el proceso de desalinización predominante. Estas ventajas incluyen un requerimiento de energía teórico menor, un potencial de corrosión también menor, y una mínima formación de escamas y

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

de precipitación. La desventaja consiste en involucrar mezclas de agua y hielo, mecánicamente complejas de mover y procesar.

Un pequeño número de plantas ha sido construido en los últimos 40 años, pero el proceso no ha tenido un éxito comercial en la producción de agua dulce para propósitos municipales. El ejemplo más reciente de una planta desalinizadora por congelación, consiste en una unidad experimental, alimentada por energía solar construida en Arabia Saudita a finales de los años 80. El experimento ha concluido y la planta ha sido desmantelada. Hasta el momento, la tecnología de desalinización por congelamiento probablemente ha tenido una mejor aplicación en el tratamiento de desperdicios industriales, que en la producción de agua potable para usos municipales.

DESTILACIÓN POR MEMBRANA

La destilación por membrana fue introducida comercialmente a pequeña escala en los años 80. Como el nombre establece, el proceso combina tanto el uso de destiladores como de membranas. En el proceso, el agua salada es calentada hasta mejorar la producción de vapor. Dicho vapor es expuesto a una membrana que puede pasar vapor pero no agua. Una vez que el vapor ha pasado a través de la membrana, es condensado en una superficie fría para producir agua fresca. En la forma líquida, el agua dulce no puede pasar en sentido inverso a través de la membrana, por lo que es confinada y recogida en la salida de la planta. Este proceso ha sido utilizado sólo en pocos sitios comparado con otros procesos, comercialmente más exitosos, debido a que requiere mayor espacio y consume mayor energía por unidad de producción. Siendo esencialmente un proceso de destilación, está sujeto a las mismas limitantes de desempeño que han sido experimentadas en los otros procesos.

Las principales ventajas de la destilación por membrana van ligadas a su simplicidad y la necesidad de pequeños diferenciales de temperatura para operar. El proceso de destilación por membrana, probablemente tiene su mejor aplicación en desalinizar agua donde exista energía térmica barata y de poca calidad, como en algunas industrias y colectores solares.

HUMIDIFICACIÓN SOLAR

El uso de energía solar directa para desalinizar el agua, ha sido investigado y utilizado por cierto tiempo. A lo largo de la Segunda Guerra Mundial, se realizaron trabajos considerables para la fabricación de pequeñas plantas que funcionaban a partir de energía solar para abastecer de agua a pequeñas comunidades. Este trabajo continuó después de la guerra, con una gran variedad de dispositivos que han sido fabricados y probados.

Estos dispositivos generalmente imitan una parte del ciclo hidrológico que se da en la naturaleza en el que el agua salina es calentada por los rayos solares, por lo que la producción de vapor de agua (humidificación) se incrementa. El vapor de agua entonces se condensa en una superficie

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

fría, produciendo entonces agua en estado líquido. Un ejemplo de este tipo de proceso consiste en un basamento de poca profundidad en relación a su área, que se encuentra cubierto por una techumbre de cristal inclinado donde se condensará el vapor de agua para posteriormente escurrir y ser captado. Ver Figura 2. 11. Diagrama de una desalinizadora solar.

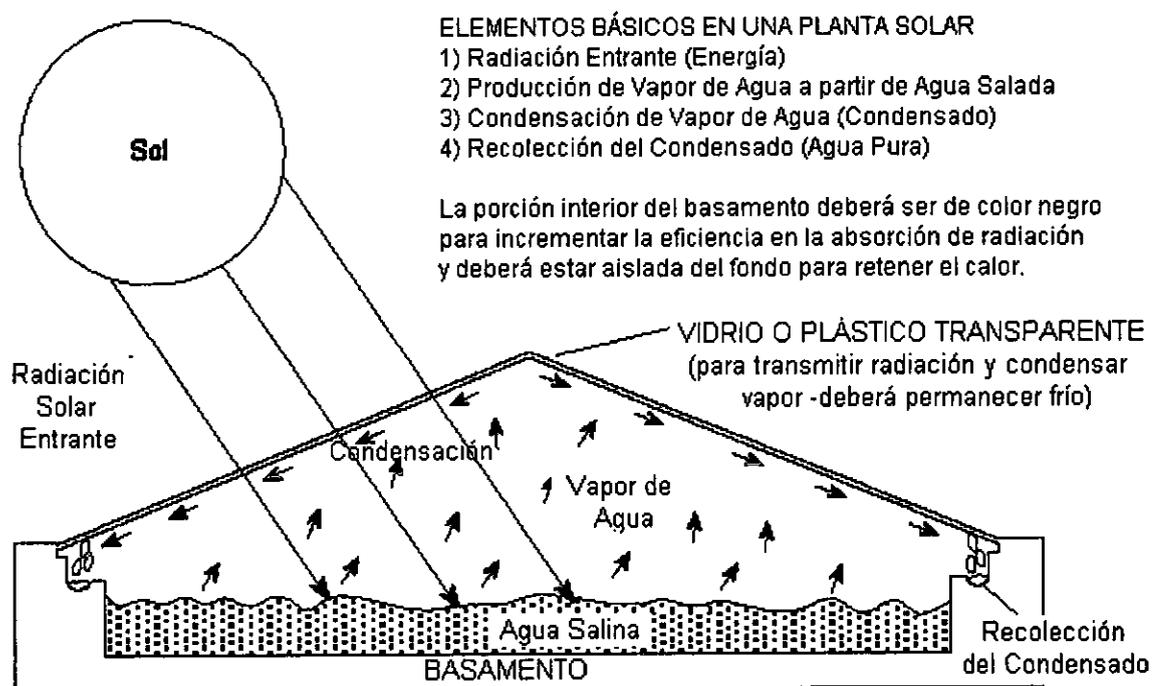


Figura 2. 11. Diagrama de una desalinizadora solar.

Se han realizado algunas variaciones con el propósito de incrementar la eficiencia, pero todas ellas siempre han compartido las siguientes restricciones que restringen el uso de esta técnica para producir agua en gran escala:

- Requerimientos de gran superficie de recolección de energía solar
- Costo alto
- Vulnerabilidad a daños por inclemencias del tiempo

Una regla de los procesos de destilación por energía solar establece que por cada metro de área de captación solar, se producen cerca de cuatro litros de agua, por lo que, para crear una instalación que produzca 4000 metros cúbicos se requiere una superficie de 100 hectáreas, lo que significa un área muy extensa que podría generar dificultades si se encuentra cerca de una zona urbana, donde el terreno disponible es limitado y costoso.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

Adicionalmente la construcción de estas instalaciones es costosa, y, aunque la energía térmica no cuesta, se requiere energía adicional para bombear el agua hacia y desde el depósito. Además, se requieren cuidados especiales en cuanto a la operación y mantenimiento para prevenir la formación de escamas causada por el secado de la superficie del basamento así como el correcto sellado de los cristales para evitar la fuga de vapor.

Una aplicación muy común de este proceso se encuentra en agrupaciones pequeñas, como pudiera ser un asentamiento familiar, o bien una villa, donde la energía solar es abundante pero la electricidad no lo es tanto.

Otros procesos de desalinización operados por energía solar y eólica

Las unidades desalinizadoras que utilizan colectores solares o energía eólica para proveer calor o energía eléctrica también han sido construidos para operar los procesos desalinizadores más comunes, como en el caso de la ósmosis inversa, electrodiálisis o destilación. Lo económico de la operación de estas plantas tiende a relacionarse con el costo de la energía utilizando estos dispositivos. Por ejemplo, en Almería, España, se tiene funcionando desde 1988 una planta de tipo MED que tiene como fuente de calor aceite previamente calentado por energía solar, dicho aceite es almacenado en un recipiente que cuenta con una pared aislante utilizando nitrógeno, esto permite que el aceite mantenga temperaturas cercanas a los 300°C durante el día y la noche, pudiendo producir agua dulce ininterrumpidamente. A la fecha, el costo tiende a ser ligeramente mayor a los costos de plantas que operan con ósmosis inversa, sin embargo, se prevé que en un futuro estos sistemas sean mejorados, permitiendo un abatimiento en sus costos de operación.

Hasta ahora hemos visto que el uso de energía convencional para operar los procesos de desalinización es generalmente más costeable que utilizar dispositivos que almacenen energía solar o eólica, aunque en la actualidad existen buenas aplicaciones de desalinizadores que aprovechan este tipo de energía. El inventario de Wangnick, realizado en 1990 contabilizaba unidades de este tipo en 100 sitios, a lo largo de 25 países. Muchas de estas instalaciones tienen capacidades de menos de 20 metros cúbicos por día. Este inventario no contabiliza una gran cantidad de puntos caseros utilizados por familias en diversas partes del mundo.

2.6 PLANTAS DUALES

En algunas situaciones, es posible utilizar energía que tiene más de un uso, que puede ser captada, cuando es transferida de un nivel alto, a un nivel ambiental. Esto ocurre con la cogeneración, donde una fuente de energía puede desempeñar diversas funciones.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

COGENERACIÓN EN TERMOELÉCTRICAS

Algunos tipos de procesos desalinizadores, especialmente los de destilación pueden ser estructurados para aprovechar una situación de cogeneración. Muchas de las plantas destiladoras instaladas en el Medio Oriente y el Norte de África operan bajo este principio. Estas unidades son construidas como una parte de un proyecto que produce tanto energía eléctrica como agua marina desalinizada para ser utilizadas ambas en alguna región en particular.

La electricidad es producida con vapor a muy alta presión, que mueve turbinas que a su vez se encuentran acopladas a generadores de electricidad. En un caso típico, los calentadores producen vapor de alta presión a una temperatura de 540° C. Como este vapor se expande en la turbina, su temperatura y nivel de energía son reducidos. Las plantas destiladoras requieren vapor cuya temperatura sea alrededor de los 120° C o menor, y esto puede ser obtenido extrayendo el vapor de menor temperatura en la porción de la turbina donde exista menor presión una vez que esta energía ha sido utilizada para generar electricidad. Este vapor entonces viaja a través del calentador de salmuera en la planta destiladora, donde es condensado en los tubos, incrementando así la temperatura del agua salada entrante. El condensado del vapor es entonces regresado al calentador para nuevamente ser calentado para su uso en la turbina.

La principal ventaja de un sistema de cogeneración consiste en la reducción del consumo de combustible si lo comparamos con la cantidad de combustible requerida si ambas plantas funcionaran de manera independiente. Dado que la energía representa la mayor parte de costo de operación en cualquier proceso de destilación, si se maneja el esquema de cogeneración se obtendrán beneficios económicos sustanciales. Una de las desventajas estriba en que ambas unidades están conectadas permanentemente, y, para que la planta desalinizadora opere eficientemente, la turbina de vapor debe de estar operando. Esto puede crear un problema con la producción de agua, cuando la turbina o el generador son sacados de producción para su reparación o mantenimiento.

Este tipo de instalaciones productoras de energía y de agua son denominadas como plantas de propósito dual. Dado que la mayor parte de los países petroleros del Medio Oriente y del Norte de África tienen una gran producción de energía eléctrica a partir de la combustión de sus reservas fósiles el esquema de plantas duales ajusta perfectamente a sus necesidades. En México, al terminar 1994, el 54.02% de la energía eléctrica producida en el país, provenía de termoeléctricas. Este indicador nos muestra que se podría aprovechar una gran cantidad de energía que actualmente es desperdiciada, para los procesos de desalinización en zonas donde el agua dulce escasea.

Otros tipos de instalaciones donde se practica la cogeneración, pueden derivar en la generación de vapor de bajo costo para propósitos industriales o para la incineración de desechos sólidos.

COGENERACIÓN EN NUCLEOELÉCTRICAS

La energía nuclear tiene un papel preponderante en la satisfacción de las necesidades a futuro, asegurando una fuente de energía más eficiente y conservando los combustibles fósiles para las

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO II. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

futuras generaciones. Adicionalmente, para lograr una distribución de población más balanceada, será necesario considerar a la energía nuclear como la fuente más adecuada para la generación de electricidad y agua potable.

El principio de cogeneración aplicado a las nucleoelectricas es muy similar al descrito en el apartado anterior. Sin embargo, deberá de tenerse en consideración que se está tratando con una fuente de calor de origen radioactivo, y que consecuentemente, el proceso no podrá ser tan directo como el utilizado en la cogeneración de termoeléctricas.

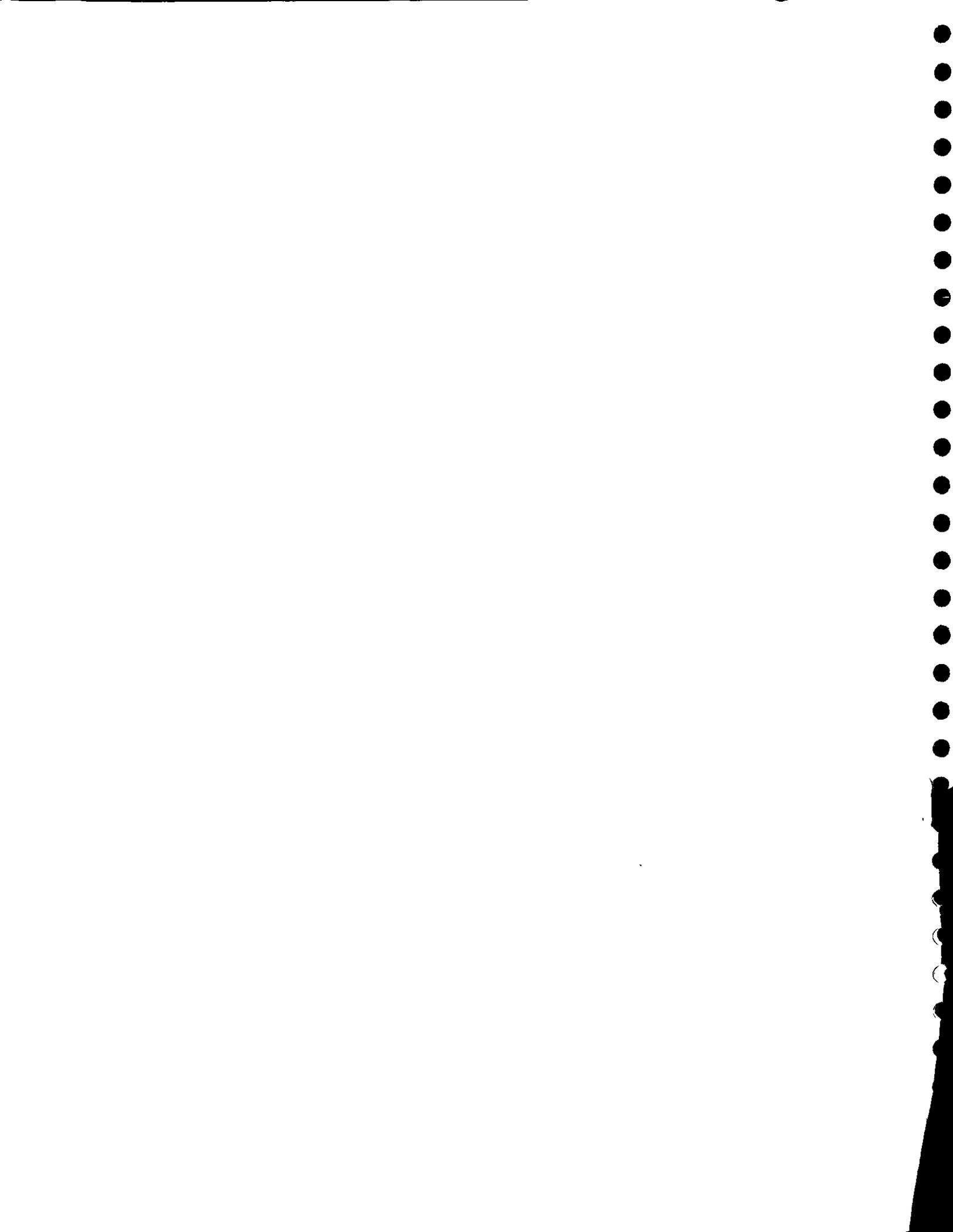
No existen impedimentos para utilizar los reactores nucleares para el suministro de energía a las plantas desalinizadoras en un lugar común; sin embargo, será esencial eliminar la posibilidad de penetración de radioactividad dentro del sistema de desalinización. Por lo menos deberán de colocarse dos barreras entre el enfriador primario y el agua salada, requiriendo adicionalmente una presión en reversa. Al acoplar una nucleoelectrica con una desalinizadora del tipo MSF, el generador de vapor deberá de ser la primera barrera y, el calentador de salmuera, actuando como condensador de vapor servirá como segunda barrera.

Para lograr que se genere una presión en reversa, el calentador de salmuera deberá mantenerse a la presión elevada suficiente así como el fluido que sirve de calentador, esto para lograr que el goteo provenga del sistema de desalinización y no ocurra dentro del mismo. En el caso de las plantas MED, que no cuentan con un calentador de salmuera, el acoplamiento tendrá que ser implantado con un sistema de aislamiento utilizando agua de alta calidad en un sistema cerrado, o bien, agua salina recirculándose en un circuito abierto. Los procesos de aislamiento así como una mayor presión en el área de la desalinizadora garantizarán que los índices de radioactividad estén dentro de la normatividad, sin embargo, es sumamente importante el constante monitoreo de estos niveles. Con los avances en el campo de la electrónica, la instalación de dichos dispositivos para no incrementará de manera sustancial el costo del proyecto.

La experiencia obtenida de acoplamiento de plantas nucleares con desalinizadoras ha arrojado que son fuentes confiables de agua potable, y que hoy en día se pueden considerar como una opción real y factible.

2.7 INSTALACIONES HÍBRIDAS

Otro método para reducir los costos totales de desalinización puede ser el uso de sistemas híbridos. Cabe señalar que los sistemas híbridos no son aplicables en la mayor parte de las instalaciones desalinizadoras, pero pueden resultar en beneficios económicos en algunos casos. Un sistema híbrido es una configuración donde se involucran dos o más procesos de desalinización. Un ejemplo consiste en utilizar tanto destilación como ósmosis inversa para desalinizar agua marina en una instalación, esto con el fin de usar y combinar las distintas características de cada uno de los procesos de manera productiva.



LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

3 CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

3.1 ESTUDIOS PREVIOS

Para la puesta en marcha de una planta desalinizadora es necesario realizar diversos estudios, entre los que destacan los estudios de las condiciones del sitio donde se pretende establecer la planta, estudios de las características del agua que será tratada, estudios de impacto ambiental y estudios de factibilidad económica que determinen la viabilidad financiera del proyecto. Estos dos últimos, por sus características particulares, se tratan de manera individual en los capítulos siguientes del presente trabajo. Respecto a los otros estudios, los más importantes se tratan a continuación.

La disponibilidad de agua en áreas desérticas es uno de los factores más importantes que deben ser tomados en cuenta en los estudios previos. Careciendo de antemano de una fuente de agua potable renovable, la expansión del ramo agrícola no se puede llevar a cabo. Todos los proyectos regionales que extraerán agua del subsuelo, requerirán estudios geofísicos (e.g. estudios sísmicos y eléctricos) debido a que la exploración de depósitos subterráneos a través exclusivamente de perforaciones, resulta sumamente costosa. En resumen, para que el proyecto sea costeable será necesario aplicar métodos geofísicos para obtener más información del subsuelo en toda la extensión del área a estudiar.

La gran cantidad de información arrojada durante los estudios geoeléctricos e hidrogeológicos deberá ser analizada a través de programas de computadora para obtener resultados precisos. El objetivo primordial de los estudios geoeléctricos e hidrogeológicos, será el reconocimiento de las condiciones litológicas y estructurales para poder evaluar su potencial de explotación.

ESTUDIOS GEOLÓGICOS

Se deberá detectar la estratigrafía del subsuelo, distinguiéndose los diversos estratos, espesores, composición y edad geológica. Una vez realizado lo anterior, se deberá generar un mapa fotogeológico del área de estudio, donde se muestre la distribución de los distintos macizos rocosos. Un estudio de este tipo deberá de incluir los resultados que a continuación se detallan:

- 1. Determinación de fallas en los macizos rocosos del área que pudieran afectar la distribución de los distintos tipos de macizos rocosos.*
- 2. Al hacer referencia a estas fallas, se deberá incluir el ángulo y el tipo.*
- 3. En las fallas encontradas será necesario determinar si éstas emergen a la superficie, y en caso afirmativo hacia donde vierte el agua que se introduce en ellas*

Una herramienta de gran ayuda para los estudios geológicos consiste en los estudios denominados geoeléctricos; el más importante es el de resonancias eléctricas que arrojará una

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

serie de curvas que irán asociadas a la distribución estratigráfica del subsuelo, conociendo los diversos materiales sedimentados, su espesor, profundidad y resistividad. Muchos métodos han sido desarrollados por diferentes autores para la interpretación asistida por computadora de las curvas de resonancia eléctrica a través del medio horizontal estratificado. Los métodos de interpretación son combinaciones de aproximaciones manuales y automatizadas. En las aproximaciones manuales las curvas serán interpretadas con la ayuda de curvas maestras teóricas, en las aproximaciones automatizadas el cálculo se realizará a través de métodos numéricos iterativos. La correlación entre la porción conocida del acuífero y la curva obtenida en los estudios geoelectricos mostrará algunos indicios sobre la naturaleza del subsuelo.

ESTUDIOS HIDROLÓGICOS.

En los estudios hidrológicos será necesario obtener información referente a los elementos climatológicos del área en estudio como: temperatura ambiental, humedad relativa, evaporación, evapotranspiración, velocidad del viento y precipitación. Estos elementos deberán ser analizados, estudiados e inspeccionados cuidadosamente para poder determinar el "grado de aridez", obtenido a través de una expresión matemática que involucra a todos los factores anteriormente mencionados.

ABASTECIMIENTO DE AGUA DEL SUBSUELO

Los estudios geohidrológicos permitirán conocer las condiciones imperantes de los mantos subterráneos, sus fuentes de recarga, su variación a lo largo de las estaciones, así como su infiltración. La transmisividad (capacidad del agua para fluir a lo largo del subsuelo) del acuífero superficial será estimada a través de diversas pruebas de bombeo en por lo menos tres ubicaciones distintas. Este estudio determinará la capacidad que tiene el acuífero para hacer fluir grandes cantidades de agua.

Los estudios previos tendrán un papel preponderante en la valoración del proyecto, ya que brindan los elementos necesarios para poder determinar si efectivamente las condiciones físicas de la región son las idóneas para la realización del proyecto.

La experiencia que se ha adquirido en las últimas décadas, ha permitido lograr una mayor eficiencia en los procesos de desalinización, logrando consecuentemente un abatimiento en los costos de construcción y operación, lo que se traduce en un decremento en el precio del producto final. Este conocimiento, producto de los proyectos realizados en el pasado y presente, se aborda en el siguiente apartado.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

3.2 EXPERIENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE PLANTAS DESTILADORAS

En las últimas cuatro décadas la industria de la desalación se ha desarrollado sustancialmente. En 1960 existían 5 plantas con una producción total de 5000 m³/día, hacia 1995 el número de plantas era de 11,000 con una capacidad total de 18,600,000 m³/día, Se estima duplicar esta capacidad para el año 2015. Desafortunadamente existen aún muchas naciones que no pueden erogar los gastos de inversión y operación. Una buena parte de las plantas desalinizadoras utilizan el método denominado MSF (multi stage flash distillation); sin embargo, el proceso denominado MED (multi effect distillation evaporation) ha despertado en los últimos años un potencial interés. Los especialistas convienen en acordar que este método es un candidato con enorme potencial en el futuro cercano.

Las enormes ventajas del proceso MED cuando opera a temperaturas elevadas (100° C) respecto al proceso MSF son:

- *Alta eficiencia térmica, con un menor número de efectos.*
- *Coefficiente elevado de transferencia de calor.*
- *Bajo consumo de energía para bombeo.*
- *Flexibilidad de operación elevada. Las plantas MED tienen un período de arranque corto, además de capacidades que permiten la producción que satisfaga tanto la demanda de agua como la demanda de consumo de energía.*
- *Una ventaja adicional que ofrecen las plantas MED, comparadas con las MSF, consiste en un diseño en el que, en caso de que ocurra una fuga en alguno de los sistemas de tubería no se contamina el destilado. Lo anterior se debe a que el líquido del lado del vapor se encuentra a una presión mayor que el líquido del lado de la salmuera. Consecuentemente, una fuga en la tubería resulta en la pérdida de algo del destilado, pero sin producir contaminación del producto final.*

Aunque existen ventajas de las plantas de evaporación por efecto múltiple (MED) sobre las plantas de destilación por etapas múltiples (MSF), es importante destacar que estas últimas también han sufrido mejoras en los últimos años y aunque la investigación apunta hacia las primeras como la tecnología del futuro, aún existe una gran capacidad instalada de plantas MSF, capacidad que puede ser aprovechada y optimizada realizando algunas mejoras.

En lo sucesivo se hará mención a algunos elementos que forman parte de las plantas MSF o bien de las plantas MED; para su mayor comprensión se incluye la Figura 3. 1 Esquema de una planta MSF y la Figura 3. 2 Esquema de una planta MED.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

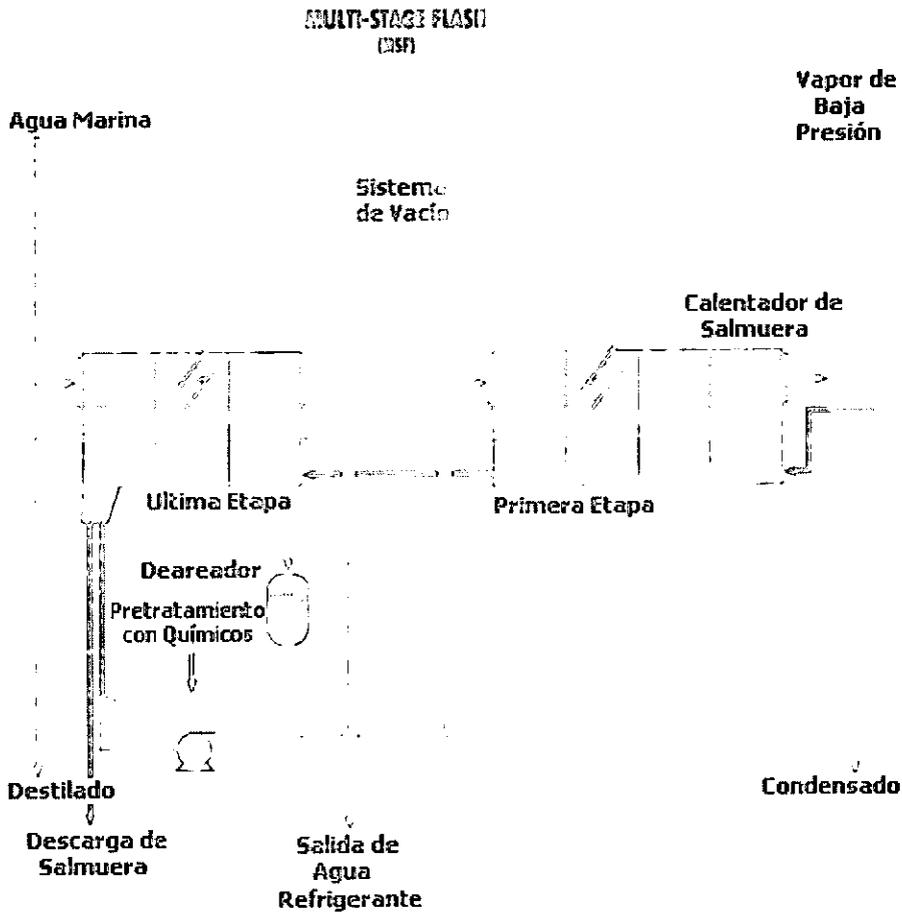


Figura 3.1 Esquema de una planta MSF

CRITERIOS SIMPLIFICATORIOS.

Dentro de las vertientes en las innovaciones de los equipos de destilación en etapas múltiples (MSF), existe una que establece un criterio que permite la simplificación en la operación y que puede resumirse a continuación.

1. No contar con grandes cantidades de equipo de reemplazo. Estudios en el comportamiento operacional y de mantenimiento en un gran número de plantas, han mostrado que el equipo de refacción existente, sólo se utiliza en algunos casos excepcionales. Incluso en muchas ocasiones este equipo de respaldo es el que ocasiona la suspensión en la producción. En la actualidad, más y más propietarios tienden a adquirir plantas que carecen de una buena parte de equipo de respaldo; lo anterior se relaciona principalmente con las válvulas de control así como los equipos de bombeo. La filosofía que apoya la postura de no utilizar equipo de refacción se basa en la utilización de materiales de alta calidad, ubicados en los lugares adecuados y proveer una sola pieza de equipamiento en almacén para un rápido

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

reemplazo en caso de falla. Un ejemplo interesante se encuentra en Sirta, Libia, donde la planta dio muy buenos resultados operacionales y no contaba con un solo artículo de reemplazo. Otros estudios han arrojado que el contar con equipo de refacción resulta sumamente costoso con relación a su beneficio, por ejemplo, el tener en bodega una bomba de recirculación de salmuera incrementa la disponibilidad de un 99.3% a un 99.53%, si se considera que este es el único equipo que pudiera provocar una suspensión en la producción, el costo adicional por incluir esta mejora sería del 1.25% sobre la inversión total. Estas consideraciones, entre otras, han llevado a concluir en el "no utilizar equipo de reemplazo para válvulas de control, bombas y eyectores".

2. No utilizar bomba de succión de salmuera. Se propone que el evaporador alcance un nivel que asegure el drenado de la última etapa por gravedad. Por ejemplo, el nivel de agua en el último evaporador deberá de estar a más de 11 metros sobre el nivel más elevado de agua en el canal de descarga. El costo adicional generado por esta modificación, que incluye la estructura de acero, se considera que será menor que el costo del equipo eliminado con esta modificación, incluyendo la obra civil. En adición a lo anterior, el costo total de mantenimiento será reducido. El consumo de energía también será menor, aunque el agua entrante deberá ser bombeada de 2 a 6 metros más que en el esquema convencional. Lo anterior está más que compensado dado que la descarga generada por la bomba, requeriría de una carga de 10 metros sobre la válvula de control.
3. No utilizar válvula de control de presión entre el calentador de salmuera y el evaporador. Usualmente, la válvula de control de presión es instalada entre el calentador de salmuera y el evaporador con la finalidad de evitar la ebullición dentro de los tubos del calentador de salmuera durante la operación normal, carga parcial o arranque del destilador. Esta válvula es costosa y su control es complicado para lograr la posición adecuada. El prescindir de esta válvula obliga a que el calentador de salmuera esté lo suficientemente abajo del nivel de agua en el primer evaporador, previniendo de esta manera la ebullición con la carga estática exclusivamente.
4. Bombas de velocidad controlada. Todos los procesos principales deberían de ser controlados en cuanto a su velocidad. Lo anterior asegura un arranque más suave de la planta así como cambios en la carga de trabajo de una manera sencilla. Adicionalmente, las válvulas de control que suelen ser muy costosas pueden ser suprimidas abatiendo los costos de inversión y mantenimiento. La bomba que extrae el agua de alimentación deberá colocarse preferentemente al lado del evaporador, esto con el fin de permitir el uso de una turbina de vapor como impulsor de la bomba. En caso de tenerse mayores distancias a partir de la fuente de vapor, pueden usarse sistemas de acoplamiento hidráulico. Las bombas pequeñas, como es el caso de la bomba de destilación y la bomba del condensado del calentador de salmuera, deberán ser equipadas con un convertidor de frecuencia para controlar la velocidad.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

1. Bombas. De acuerdo a las necesidades de diseño de cada planta, se deberá dimensionar el equipo de bombeo que satisfaga los requerimientos en cada etapa del proceso. Por ejemplo, la bomba de destilado y la bomba de calentador de salmuera, suelen ser más pequeñas que la bomba que alimenta a la planta; regularmente, se encuentran en el mercado diversos fabricantes que pueden ofrecer tecnología confiable y relativamente económica para bombas de mediano tamaño. Sin embargo, para bombas de gran tamaño, el universo de fabricantes se reduce, por lo que los precios se incrementan de manera sustancial. Debido a lo anterior, se pueden plantear esquemas en los que se utilicen arreglos de bombas en paralelo para satisfacer las demandas sin realizar erogaciones considerables, pero siempre se deberá tener especial cuidado en el diseño por el espacio que un arreglo de bombas pueda ocupar. También deberá tenerse en cuenta que la carga máxima de las bombas existentes en el mercado limitará la velocidad de la salmuera dentro de los tubos de condensado, resultando en coeficientes de transferencia de calor menores y, consecuentemente mayores áreas de transferencia de calor. Es entonces, de gran importancia visualizar el mercado de bombas muy cuidadosamente al diseñar plantas de gran tamaño (100,000 m³/día).
2. Condensadores/Precaentador. Existen varios aspectos en el diseño relacionado con los condensadores de evaporadores de gran tamaño que requieren atención cuidadosa y cambios del diseño convencional, como puede ser la longitud y disponibilidad de la tubería óptima dado que el análisis puede arrojar dimensiones de tuberías inexistentes o escasas en el mercado lo que además de dificultar la solución, incrementaría sustancialmente el costo. Otros factores que deberán tomarse en cuenta son: el flujo del vapor en los condensadores para minimizar pérdidas de calor con la caída de presión, problemas mecánicos como el peso del arreglo de tubería, expansión térmica de la tubería, vibraciones, etc.
3. Deaerador. Los deaeradores son estructuras muy grandes y representan un factor considerable en el costo. 45% de los gases no condensables son liberados en el deaerador y tienen que ser bombeados al ambiente por medio del sistema de eyección. Los sistemas que no recirculan no utilizan un aereador separado. La cantidad de gases no condensables liberados llegan a un 60% en la primera etapa y otro 20% es liberado en las etapas 2 y 3. Por consecuencia la energía de extracción de dichos gases es relativamente baja. Para mejorar la deaeración en la primera etapa, se recomienda diseñar esta etapa como un deaerador por evaporación, esto brinda a las instalaciones una mejora en el proceso de liberación del gas. Alcanzando el tiempo de permanencia necesario y mejorando las condiciones de transferencia de masas también se mejorará la liberación de CO₂ en la primera etapa. Incrementando el tamaño de la primera etapa y por consecuencia incrementando el volumen de permanencia de la salmuera también se logrará la estabilización del volumen del líquido. Esto siempre es un problema al arrancar la operación, así como al realizarse cambios en los parámetros de operación. Además, debido a la breve permanencia en la etapa 1 de muchos evaporadores, las fases de separación resultan insatisfactorias.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

El vapor y los gases entrantes son transportados con la salmuera hacia la segunda etapa, con sus respectivas consecuencias de balance y eficiencia en la extracción del gas. En muchas instalaciones las aperturas de los orificios tienen que ser aumentadas durante la operación inicial debido a este fenómeno.

4. Válvulas. *Contando con el uso de bombas de velocidad controlada, no se requerirá mayor control de válvulas en el sistema de control de flujo del vapor. Lo anterior se aplica al sistema de control de agua marina. El nivel de salmuera en la última etapa es autocontrolado y un sistema de recirculación de agua para enfriamiento no se requiere.*

5. Selección del material.

La selección de materiales es una de las tareas más importantes y críticas en el diseño de una planta MSF, y deberá cubrir las siguientes características:

- *Resistencia contra la corrosión desde el interior y el exterior.*
- *Disponibilidad y competitividad.*
- *Fluctuaciones bajas en el costo del material básico.*
- *Precios bajos incluyendo materiales y fabricación.*
- *Baja tendencia a formar escamas (sobre todo en los tubos de condensación)*
- *Alta resistencia mecánica.*

Para su mejor compresión, se presentarán las sugerencias referentes al material ocupado dentro de cada uno de los elementos más importantes que componen una planta MSF.

a) Evaporador. *Las paredes y divisiones exteriores han sido fabricados en acero inoxidable, acero al carbón recubierto con acero inoxidable o cuproníquel 90/10. En la actualidad la totalidad del interior de los evaporadores MSF es manufacturada con diversos grados de materiales resistentes a la corrosión. La mayor parte de los evaporadores manejan acero inoxidable del tipo 316L. Los tubos de condensación suelen ser de titanio, con espesor de hasta 0.7 mm. La tubería de titanio de menor espesor (0.5mm) también se utiliza en las etapas de recuperación de calor con muy buenos resultados. Los tubos del condensador deben colocarse alrededor de las placas de la tubería. Estas placas suelen hacerse de Bronce Níquel Aluminio, esta aleación sufre menos ataques de galvanización de la tubería, sin embargo, su fabricación es más complicada. La aleación de bronce y aluminio es comúnmente utilizada, pero es muy importante protegerla por medios catódicos para evitar su galvanización. Las aleaciones de cuproníquel también son utilizadas para las placas de la tubería, y ofrecen buena capacidad para soldarse, así como resistencia a la galvanización. Los soportes de dichas placas suelen hacerse de acero inoxidable. Los contenedores del agua*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

utilizan aleaciones de CuNi90/10 recubiertas de acero, con espesores de entre 2 y 3 mm. La tubería que interconecta a los recipientes de agua también suele utilizar la aleación de CuNi90/100 recubierto de acero.

- b) Calentador de Salmuera. En la cubierta, al existir exclusivamente vapor puro, sin la presencia de otros gases no condensables, se puede utilizar aleación de acero y carbón. En los tubos de condensado, dado que su condición es crítica por tratarse de la región donde más fallas se presentan al realizarse la limpieza de escamas, se recomienda utilizar materiales resistentes como aleaciones de cobre, níquel y acero, con un espesor de 1 mm. La corrosión debida al vapor lateral no es un problema, incluso si existen altas concentraciones de amoníaco, esto se debe a que la cantidad de oxígeno es muy baja e insuficiente para producir una corrosión significativa. En los demás elementos, como las placas de tubería, el soporte de dichas placas y recipientes del agua, se utilizan aleaciones similares a las existentes en el evaporador.*
- c) Bombas. Para las bombas que mueven a la salmuera, el acero inoxidable es excelente en condiciones de flujo, sin embargo, también es necesario considerar las condiciones en el caso estático, por lo que deberá de considerarse en aquellas partes donde se presente dicha condición otro tipo de aleación, como pudiera ser una de níquel fortalecido en combinación con acero inoxidable galvanizado. En el caso de las bombas de destilado y las de manejo del condensado, la cubierta tendrá que ser de aleación de níquel reforzado, el propulsor deberá de ser de una aleación de cobre, fierro y magnesio, así como el eje se suele hacer de acero inoxidable.*
- d) Válvulas. Para las válvulas de aereación del agua entrante se utiliza en la cubierta y eje acero inoxidable, ambos con protección catódica. La válvula de deareación de la salmuera deberá tener una cubierta y eje de acero inoxidable con protección catódica, también se llega a utilizar para el cuerpo y disco aleaciones de níquel aluminio bronce. En el caso de las válvulas del destilado se utiliza acero inoxidable.*
- e) Tuberías. La tubería del agua entrante deberá de soportar fuerzas de vacío. En la tubería de deareación de la salmuera se utiliza CuNi90/10 recubierto con acero carbonado. En el caso de tuberías pequeñas se recomienda utilizar aleaciones de CuNi90/10 sin recubrimiento. En las tuberías del destilado se recomienda utilizar acero inoxidable. Las tuberías del condensado son de acero carbonado mientras que las tuberías de las diversas etapas son de acero inoxidable.*
- f) Sistema de vacío. En todo el sistema de vacío se suele utilizar aleaciones de acero inoxidable, el único riesgo de corrosión externa existe cuando se presentan temperaturas superiores a los 60° C, para minimizar esto, se recomienda pintar las caras, particularmente en aquellas regiones donde pudiera presentarse acumulación de cloratos. En plantas donde pueda existir presencia de bromuros, puede ocurrir una severa corrosión del acero inoxidable en las regiones de altas*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

temperaturas donde estos gases se concentran. Esto se puede corregir removiendo los componentes de halógeno; sin embargo, de no ser posible, se recomienda utilizar titanio en las partes involucradas. En los condensadores barométricos, que consisten fundamentalmente en vasos dentro de los cuales el agua es atomizada, se recomienda utilizar aleaciones de acero inoxidable con molibdeno al 6%.

Estudios recientes han revelado que la adición de Molibdeno en conjunción con el Cromo en las aleaciones, ha mejorado sustancialmente la resistencia a la corrosión. Diversos investigadores han propuesto teorías que expliquen el papel del Molibdeno en la inhibición de los mecanismos de corrosión. Ha sido bien estudiado que la adición de Molibdeno en aleaciones de acero prescindiendo del Cromo, produce un comportamiento similar al del acero común, sin embargo, cuando el Molibdeno interactúa con el Cromo, se logran propiedades superiores en la aleación, reduciendo los niveles de corrosión de manera notable.

DIVERSAS CAUSAS DE SUSPENSIÓN EN UNA PLANTA MSF

Es una práctica operacional común el no dejar fuera de operación una planta de destilación, más aún si ha estado funcionando ininterrumpidamente durante un largo período, a menos que sea absolutamente necesario, lo anterior obedece a que es del conocimiento general que el poner fuera de operación este tipo de plantas, representa un golpe térmico para todos los componentes por lo que será mejor evitarlo en la medida de lo posible. Aunado a lo anterior, la terminación de la operación causa entrada de aire al sistema, lo que a su vez incrementa la posibilidad de corrosión, especialmente donde las superficies tienen una serie de irregularidades donde el agua puede quedar estancada.

Las causas principales que ponen fuera de operación estas plantas son:

- 1. Alta conductividad. La alta conductividad es normalmente debida al goteo de algunos de los tubos en el intercambiador de calor, producido por la corrosión de la tubería o por la pérdida en el ajuste de las conexiones. El margen operacional permite que la conductividad alcance hasta 200 o 300 microsiemens por centímetro, sin embargo, la planta debe dejar de operar y la causa de la falla deberá ser corregida.*

Al respecto será de mucha utilidad establecer un monitoreo de cada una de las etapas, o, por lo menos llevar a cabo un muestreo para poder determinar en qué etapas se ha presentado alguna falla. Una vez que la planta ha dejado de operar, la identificación de los tubos que han fallado en cada etapa deberá de hacerse lo antes posible; para ello, existen dos métodos regularmente utilizados; el primero, que consiste en llenar el evaporador y observar de dónde proviene el goteo, y, el segundo, en el que se produce un vacío en el evaporador, posteriormente se adhiere una película delgada de algún material, en los puntos donde se presenten rupturas de esta delgada película existe una falla en la tubería.

- 2. Pérdida de vacío. Ésta puede ocurrir por diversas fallas, entre otras, por la avanzada corrosión en el vaso del evaporador o en algún otro equipo de vacío o tubería; también puede atribuirse a deficiencias en las uniones entre elementos que permiten la entrada de*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

aire del exterior. Normalmente, el equipo encargado de la operación y mantenimiento adquiere suficiente experiencia para ubicar tales puntos de falla; en caso contrario, se deberá realizar una investigación especial con la ayuda de una detección selectiva de emisiones de ruidos.

La pérdida de vacío puede ser tolerada en tanto el sistema sea capaz de evacuar la entrada del aire, en caso contrario se requerirá poner fuera de servicio a la planta y detectar la falla. Lo anterior puede ser una de las labores de mantenimiento que más tiempo demanden, debido a la dificultad e incluso imposibilidad de acceso al punto de falla.

3. Falla en el equipo asociado. Cada planta tiene su propia historia, después de muchos años de operación los equipos que presentan fallas con frecuencia pueden ser identificados e incluidos en el programa de mantenimiento preventivo, sin embargo existen muchos componentes que sufren diversas fallas en la mayor parte de las instalaciones MSF, como por ejemplo: válvulas de control y tuberías asociadas, propulsores y partes internas de las bombas de reciclado de la salmuera, tubería de agua salada pintada.

El tiempo promedio en el que una planta del tipo MSF está fuera de operación es de 20 días al año, aunque una falla inesperada puede incrementar dicho lapso, particularmente en las plantas que llevan mayor tiempo en operación. Cuando se detecta que la planta comienza a ser improductiva o ineficiente, debe de analizarse la conveniencia de seguir operando, o bien, comenzar la construcción de una instalación nueva.

3.3 EXPERIENCIAS EN LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE PLANTAS CON MEMBRANAS

Las plantas desalinizadoras que funcionan con membranas, particularmente las de ósmosis inversa están hoy en día, cobrando más y más importancia, por otra parte las antiguas plantas destiladoras son menos eficientes y están siendo sustituidas por tecnologías de membrana.

Existen muchas experiencias en los procesos de ósmosis inversa (RO), que han resultado económicas y eficientes, sobre todo en las naciones del Medio Oriente, norte de África, los países del Mediterráneo y en el Mar Caribe. Durante los últimos años los requerimientos del mercado, han demandado plantas de ósmosis inversa de mayor tamaño, y esto no solo se ha presentado por el crecimiento del mercado, también en buena parte se ha debido al desarrollo tecnológico. La tecnología de desarrollo de membranas unida con al aumento en la eficiencia de las bombas y procesos de recuperación de energía con turbinas, ha mejorado sustancialmente las oportunidades en el mercado de los procesos RO. Consecuentemente, el diseño de la bomba alimentadora de alta presión (dispositivo que más energía consume) y la recuperación de la energía de alta presión regresada en el sistema, son vitales en cuanto a importancia.

De acuerdo al tamaño de la planta deberán de considerarse distintos aspectos en su diseño, por ejemplo, para plantas pequeñas basta con una sola bomba instalada, para plantas un poco mayores es recomendable utilizar bomba de alimentación y bombas reversibles que harán las funciones de las turbinas de recuperación. Para plantas de gran tamaño se deberán de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

considerar en el diseño bombas de alimentación más eficientes y bombas reversibles o en algunos casos turbinas tipo Pelton para la recuperación de energía, estas últimas han demostrado ser más eficientes para grandes flujos de agua.

INNOVACIONES EN LOS PROCESOS DE MEMBRANA

Los sistemas de ósmosis inversa que extraen directamente agua del mar, requieren un pretratamiento para mantener el control de la acumulación de sedimentos en la membrana. Consideraciones de buen desempeño a largo plazo, marcarán la pauta para los conceptos de diseño, dentro de los cuales deberá de considerarse una tasa reducida en el flujo que permeará. En los últimos años, el desempeño general de los procesos por membrana se ha mejorado significativamente, y nuevas tecnologías de microfiltración del agua se han introducido comercialmente. Estos desarrollos pueden ser utilizados para mejorar la calidad del agua superficial a niveles incluso, mejores que los parámetros del agua extraída del subsuelo. Estos nuevos desarrollos permiten que los sistemas de ósmosis inversa ofrezcan mayor confiabilidad y menores costos en su producto final. Los costos para desalinizar agua subterránea con niveles bajos y medios de sales disueltas, resultan hoy en día, competitivos respecto a los esquemas tradicionales de extracción de agua. Esto es especialmente cierto cuando el bombeo se requiere hacer a través de largas distancias o grandes profundidades, o bien, si se requiere algún tratamiento del agua del subsuelo. Los costos para desalinizar agua marina son ligeramente mayores a los costos para desalinizar agua subterránea. Esto se debe principalmente a que los sistemas de tratamiento de agua marina requieren equipos de bombeo más costosos, así como aleaciones de tubería con mayor resistencia a la corrosión. Los costos de los elementos que intervienen directamente en los procesos de ósmosis inversa, representan entre un 6 y 8 por ciento del costo total; la mayor porción de éste corresponde a los costos del equipo de procesamiento y consumo de energía.

Con la introducción de membranas compuestas por poliamida, los procesos de ósmosis inversa han mejorado sustancialmente si los comparamos con los primeros intentos en los que se utilizaban membranas de acetato de celulosa. Sin embargo, los primeros diseños de polímeros de poliamida alifática resultaron inadecuados al presentar problemas de infiltración de sales. Con el desarrollo de la nueva generación de membranas compuestas, hechas de poliamida aromática, los resultados mejoraron sustancialmente. Desde 1986, el rechazo de sal ha mejorado continuamente sin menoscabo de la permeabilidad del agua. La última tecnología utilizada, ha tenido un flujo de más del doble del existente en 1978, mientras que la cantidad de agua que traspasa la membrana, se ha reducido cuatro veces. Actualmente, elementos de membrana con un rechazo nominal de sal de un 99.7% y un flujo de permeado de 22.7 m³/día, están disponibles comercialmente. Las especificaciones nominales de los elementos que intervienen en una planta RO, no corresponden exactamente al desempeño actual de las plantas desalinizadoras, dado que cada uno de los elementos probado de manera independiente arroja resultados que superan al rendimiento del mismo elemento en condiciones de operación. El rendimiento total del sistema puede ser calculado basándose en los parámetros intrínsecos de la membrana, el área de membrana instalada, la composición del agua entrante y las condiciones operativas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

Las características de las membranas actuales permiten que los sistemas trabajen con una elevada tasa de recuperación que puede llegar a un 45%, este valor se logra con presiones de entre 55 y 70 bar y temperaturas de 18 a 28° C; bajo las condiciones anteriores, la salinidad del producto oscila entre las 300 y las 500 partes por millón.

Para una cierta salinidad en el agua de alimentación y una cierta capacidad de rechazo salino de la membrana, la salinidad del producto está en función de la temperatura del agua entrante, tasa de recuperación y flujo del líquido permeado. Un incremento de la temperatura del agua entrante resulta en un incremento del valor de la sal y el agua que se difunden en la membrana, a razón de un 3% por cada grado centígrado. Dado que las plantas usualmente operan a una tasa de flujo constante, los cambios en la salinidad del permeado dependen casi de manera directa de los cambios en la temperatura del agua entrante.

La salinidad del permeado es inversamente proporcional al promedio del flujo del permeado. Flujos de permeado elevados, incrementan la dilución de iones de sal que pasan la membrana, y, consecuentemente, resulta en una salinidad menor del permeado.

En la actualidad se considera que los procesos de membrana resultan excesivamente costosos para desalar el agua marina, sin embargo, se han desarrollado innovaciones y mejoras en las membranas, que permiten obtener agua potable a costos accesibles. Con algunos cambios, se ha logrado mayor eficiencia, reduciendo el fenómeno de concentración de polarización que se da en las vecindades de la membrana. Otra mejora consiste en una mejora en la distribución del flujo a través de elementos enrollados de manera espiral, con esto se reducen en gran medida las áreas de flujo muerto que tradicionalmente se observan.

Como se ha venido comentando a lo largo del presente trabajo, durante los últimos treinta años se han depurado las técnicas de ósmosis inversa, tales como el desarrollo de la membrana enrollada en forma de espiral, así como membranas formadas por películas muy delgadas. Los procesos de monitoreo y controladores de los sistemas han mejorado sustancialmente con el desarrollo de la electrónica de estado sólido y controladores lógicos programables. La experiencia también ha enseñado a los ingenieros a realizar mejoras notables en los diseños mecánicos e hidráulicos, que permiten a su vez aprovechar el potencial de las membranas y simplifican la operación y el mantenimiento.

En la actualidad, los sistemas de ósmosis inversa, cuentan con las siguientes características.

Distribución del Flujo.

Es ampliamente conocido que el flujo del líquido entrante hacia la membrana en espiral, es desigual a lo largo de la superficie del elemento. Las razones se describen a continuación:

- a) El agua salada entra por un orificio que no está centrado, debido a que el centro geométrico se encuentra ocupado por el tubo de salida del producto.*
- b) La cavidad entre la cubierta del vaso de presión y el frente final de la membrana no se encuentra diseñada para entregar un flujo igual en toda la sección transversal.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

- c) *La estructura física del elemento de membrana es tal que las capas de espirales cercanas al centro están enrolladas más fuertemente que aquellas que se encuentran en la porción más cercana al paño exterior. El resultado se traduce en una resistencia desigual que produce un flujo desigual cuyo volumen de flujo es mayor en las capas exteriores y mínimo en las capas cercanas al centro.*

Mezclado en los límites de las capas.

Los investigadores han intentado diseñar espaciadores para mantener las membranas equidistantes a lo largo del ensamble en espiral, induciendo una mejor mezcla en los límites de las capas. Los espaciadores plásticos de sección diagonal, o bien algunos tipos de mallas, que en la actualidad han cobrado gran uso, han resultado inadecuados debido a que generan "puntos muertos" a lo largo del trayecto del flujo. El agua se introduce en el espaciador y sigue el camino donde se presenta menor resistencia, que precisamente es la trayectoria generada por el material plástico de sección diagonal. Conforme el flujo se aproxima a la descarga, no existe una trayectoria clara que pudiera seguir, exceptuando las porciones superiores y debajo de los elementos plásticos. Lo anterior puede ser logrado, pero no a las velocidades en las que fluye el agua en una membrana de ósmosis inversa. El agua consecuentemente toma el camino de menor resistencia, disminuyendo por consecuencia, la efectividad de los espaciadores.

Contaminación de la membrana.

Se ha detectado contaminación severa en estos "puntos muertos", ocurriendo entre cada una de las hojas de la membrana (existen muchas hojas de membrana en cada elemento de espiral de 8 pulgadas de diámetro). A largo plazo, la contaminación biológica que ocurre en dichas áreas, crece, y el contaminante eventualmente ocupa por completo al espaciador. En estas circunstancias, las membranas son retiradas y sujetas a una limpieza extensiva con ayuda de químicos. Normalmente, se trata de limpiar "in situ" periódicamente, antes de que se alcance un grado elevado de contaminación. Probablemente, los problemas de contaminación sean los que hayan requerido mayor inversión y esfuerzo, durante los últimos diez años.

Tecnología MWDI (Mineral Water Development International)

El principal elemento de la tecnología MWDI consiste en un distribuidor de flujo que supera la mayor parte de los problemas encontrados en el flujo desigual a través de la membrana, dado que más cantidad de fluido es forzada a pasar en aquellas regiones donde tradicionalmente el flujo es inadecuado. Debido a que la concentración de sal no alcanza el mismo nivel que antes, la membrana (que remueve el mismo porcentaje de iones, sin importar su concentración) produce agua de mejor calidad debido a que la membrana es expuesta a menor concentración de iones.

Las condiciones hidrodinámicas mejoradas permiten mayor flujo, dado que la diferencia en la presión osmótica es menor, por lo que se requiere menor cantidad de membranas en serie, haciendo más eficiente el consumo de energía.

Las condiciones de operación en las instalaciones observadas, no se ajustan a los estándares normales aplicados a los elementos de membrana comerciales. Normalmente, un mínimo de un

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

litro por segundo es recomendado para el orificio de entrada. El diseño MWDI se presenta con las capacidades de operación, sin los problemas de contaminación usuales. Las condiciones hidrodinámicas mencionadas anteriormente permiten que se utilicen presiones de 58 bar, en lugar de los 65 bar, utilizados regularmente.

En resumen, los sistemas MWDI resultan significativamente mejores que los sistemas convencionales, y los resultados, generalmente están apoyados por la teoría común; sin embargo, todavía hay mucho por aprender para comprender de manera completa el fenómeno, por lo que se requerirán investigaciones adicionales bajo condiciones controladas. Hay asuntos concernientes a la manera en la que los elementos de la membrana son operados, como por ejemplo, los límites recomendados por los fabricantes. Estas serán las condiciones, sin embargo, que permitirán al sistema operar más eficientemente que sus contendientes comerciales. Una reducción en el consumo de energía de más del 25% se ha observado en pruebas de campo en comparación con los procesos de ósmosis inversa convencionales. La reducción en el área de membrana permitirá una reducción en los costos de capital. El rendimiento resultante del sistema permitirá la producción de agua a un precio de venta menor.

RENDIMIENTO, RESTAURACIÓN, AUTOPSIA Y ANÁLISIS DE MEMBRANAS EN ESPIRAL

En el presente apartado, se muestran algunas experiencias referentes al rendimiento, restauración, autopsia y análisis de contaminación de membranas comerciales tanto en espiral como membranas de fibra hueca. Entre otras cosas, los análisis han revelado que la composición de los elementos contaminantes depositados en las membranas es similar, sin importar el tipo de membrana. Dichos depósitos están compuestos principalmente por óxidos residuales de fierro, originados por el coagulante ($FeCl_3$) que no son removidos en su totalidad por el filtro. Sin embargo, dichos depósitos están ligeramente adheridos a la superficie de la membrana, por lo que podrán ser removidos con alguna sustancia. La presencia de baja concentración de materia orgánica así como un conteo bajo en bacterias, sugiere que las membranas no están biológicamente contaminadas a pesar de no realizarse ningún proceso de desinfección.

En los procesos de desalinización por ósmosis inversa, el principal problema que hay que enfrentar consiste en la contaminación de las membranas. Este fenómeno es sumamente complejo, no se ha podido definir de una manera general, sin embargo, existe una coincidencia en su definición, cuando se menciona la formación de depósitos indeseables en las superficies de las membranas. Lo anterior ocurre cuando los sólidos rechazados por la membrana no son regresados a la corriente de desecho. La contaminación puede clasificarse en dos grupos, el primero engloba a la contaminación inorgánica debido a la acumulación en la superficie de la membrana de escamas inorgánicas o materia coloidal; un segundo grupo abarca la contaminación biológica, debida a la adhesión de microorganismos en la superficie de la membrana, seguida de su respectivo crecimiento y multiplicación en presencia de un adecuado abasto de nutrientes en el agua entrante pretratada. La contaminación puede ser prevenida con un diseño adecuado de la planta, incluyendo un pretratamiento eficiente y también con una operación y mantenimiento adecuados. Sin embargo, si el pretratamiento es inadecuado e incapaz de remover toda la materia que potencialmente pudiera contaminar, el proceso será casi inevitable, y se presentará tarde o temprano. La contaminación de la membrana no sólo afecta a

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

la cantidad y calidad del agua producida, es también determinante en la reducción de la vida útil de la membrana.

En general, una reducción en el rendimiento de la membrana, puede corregirse limpiando la membrana. La limpieza se puede definir como "el proceso donde el material es liberado de una sustancia que no es parte integral de dicho material". La limpieza es realizada para restaurar el rendimiento original de la membrana cuando ésta sufre un decremento en su permeabilidad de un 10%. Aunque existen varias técnicas de limpieza incluyendo procesos físicos y químicos, o combinación de ambos, los segundos son ampliamente usados en la industria de la ósmosis inversa. En todos los casos, el proceso de limpieza depende del tipo de contaminantes depositados en la superficie de la membrana, y, para una limpieza exitosa se deberá de identificar plenamente el contaminante. Una autopsia destructiva brinda a la ciencia las herramientas para optimizar los procesos de limpieza, y suele utilizarse una vez que los procesos normales de limpieza han fallado en la restauración del rendimiento original de la membrana. El proceso de autopsia, involucra principalmente cortes abiertos en la membrana, exámenes visuales y microscópicos de la superficie de la membrana, análisis químicos y biológicos de los contaminantes, análisis de la superficie de la membrana y del material de la membrana.

Una investigación paramétrica y sistemática deberá de incluir a las variables que intervienen en el proceso, por ejemplo, el tipo de coagulante, el catalizador del coagulante, así como otros químicos y sus respectivas concentraciones, método de desinfección, concentración del desinfectante, el PH del agua entrante, la tasa de flujo, la calidad del agua pretratada, etc.

Los agentes limpiadores que más se utilizan son sustancias ácidas y alcalinas, detergentes y mezclas de ácidos o alcalinos con detergente. Las dosis de los agentes de limpieza varían de un 0.5 a un 1%. La metodología operante consiste en tres pasos: a) medición del rendimiento de la operación de la membrana que se estima se ha contaminado en exceso; b) ejecución del proceso de limpieza y c) medición del rendimiento con la membrana previamente limpiada.

En cada etapa del sistema, deberán de medirse los parámetros relativos a conductividad y turbiedad, tanto del agua entrante como del agua procesada, antes y después del proceso de limpieza, para así contar con los elementos necesarios para comparar el rendimiento. Estudios realizados recientemente han revelado información de interés; la sustancia química más promisoría parecer ser el ácido hidroc্লórico (0.8%), que ha demostrado lograr un incremento en la tasa de flujo de un 12.3% y un decremento en la conductividad del 4.5%, a la par de una reducción en la turbiedad de un 21.1%.

Los métodos de limpieza de membranas han sido regularmente desarrollados por los fabricantes, mientras que los operadores de las plantas los han adaptado a sus propios requerimientos. Sin embargo, existe una carencia de información en este campo. La experiencia existente es escasa, dispersa y no permite alcanzar conclusiones globales de interés para los operadores.

Los métodos de limpieza se dividen en dos grupos:

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

- *Métodos físicos. Lavados con agua (hacia delante o atrás), presión del producto en sentido inverso, vibraciones, drenado por aire y relleno con agua, purgas con aire, permeado con CO₂ y lavado con esferas de esponja en membranas tubulares.*
- *Método químicos. Limpieza de la membrana con diversas combinaciones de agentes químicos, por ejemplo, detergentes alcalinos seguidos de ácido peracético y peróxido de oxígeno, ácido cítrico estabilizado con amoníaco, productos propietarios como Flocclean, entre otros. En algunos casos, la limpieza es seguida por el uso de agentes restauradores de la membrana (etermetilo de polivinil, conocido como PT-A, y ácido tánico, conocido como PT-B).*

También se suelen combinar métodos físicos y químicos para lograr mejores efectos.

Los tipos de contaminación que pueden ser encontrados en las membranas son:

- *Sólidos suspendidos*
- *Coloides (silicio, productos de aluminio y fierro cuando son usados como anticoagulantes)*
- *Óxidos de metales (hierro, manganeso, etc.)*
- *Costras o escamas (precipitados de sales inorgánicas, como sulfato de calcio y carbonato de calcio)*
- *Lamas biológicas (algas, productos derivados del uso de biocidas orgánicos)*
- *Materia orgánica*
- *Aceite y grasas*

Como se ha venido comentado, la literatura referente a la limpieza de las membranas es muy reducida, sin embargo, según las experiencias adquiridas en los últimos años, se puede concluir:

- *que la limpieza de las membranas es esencial para poder mejorar el rendimiento en la producción*
- *que los métodos más utilizados son los químicos, aunque en ocasiones, sus resultados no son positivos*
- *el éxito en una aplicación específica no implica el mismo resultado en otra aplicación*
- *no existe una técnica generalizada de limpieza*
- *los métodos físicos no son muy utilizados, excepto en el flujo de agua cuando se han utilizado grandes cantidades de químicos*

Buena parte de la metodología, ha surgido a partir de ensayo y error, por lo que existe una enorme carencia en el conocimiento de los mecanismos de limpieza, y específicamente en la acción de los agentes limpiadores para remover los contaminantes. Es del conocimiento común

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

que los procesos de limpieza se deberán de llevar a cabo cuando se haya detectado un decremento en la productividad o se hayan registrado incrementos en las pérdidas de presión.

Los pasos a seguir para determinar el método más óptimo de limpieza de la membrana, deberán incluir la identificación del tipo de contaminante, selección del agente limpiador y determinación de la eficiencia en el limpiado (se tendrá que determinar el rendimiento antes y después de haber llevado a cabo el proceso de limpieza). Algunas técnicas complejas se han utilizado para la identificación de los depósitos, las más utilizadas son: difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, espectroscopía infrarroja, microscopía óptica, microscopía por barrido de electrónico, rayos X con dispersión de energía y absorción atómica. Varios autores coinciden en la utilización de la autopsia como mejor método, sin embargo, al ser éste un método destructivo, no podrá ser utilizado a gran escala en una planta industrial. Adicionalmente, se han realizado estudios de químicos que remueven la película orgánica formada en la superficie de las membranas en espiral, entre las sustancias que se han estudiado destacan los surfactantes y detergentes, agentes caotrópicos, bactericidas, enzimas y antiescalantes, otros estudios han arrojado que la combinación que más efectividad ha tenido, ha sido la urea junto con el sulfato dodecil de sodio.

Los resultados esperados en los próximos años podrán hacer posible la identificación de los componentes que contaminan las membranas, además permitirán ubicar los métodos de limpieza más apropiados en cada caso, y por último, permitir el mejoramiento de las tecnologías de pretratamiento.

En el presente apartado, nos hemos estado enfocando principalmente a las plantas de ósmosis inversa, sin embargo, existen ciertas condiciones en las que una planta que opere con proceso de electrodiálisis resulta una opción más viable.

Los procesos de electrodiálisis, requieren un tratamiento preliminar muy simple, debido a las siguientes características:

- *Buena tolerancia por parte de las membranas hacia el cloro y cloraminas utilizados en los controles biológicos en los procesos de tratamiento. Esta característica evita la posterior declorinación requerida en otros procesos sensibles a dichas sustancias.*
- *La elevada resistencia de las membranas de electrodiálisis reversible contra los ataques bacteriales.*
- *La geometría de los canales hidráulicos en los espaciadores en los sistemas de electrodiálisis reversible es superior que las mallas de los sistemas de ósmosis inversa. Consecuentemente, las membranas de electrodiálisis se bloquean con mayor dificultad, por lo que son más adecuadas para los tratamientos de aguas residuales. Esta característica es especialmente importante en aquellos proyectos donde el agua entrante contiene gran cantidad de óxidos de silicio.*

Los procesos de electrodiálisis reversible tienen como característica principal, el cambiar su polaridad en varias ocasiones a lo largo de una hora, logrando así un proceso de autoenjuague de sus membranas, por consecuencia, este sistema no pierde capacidad por la acumulación de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

sustancias inertes o materia orgánica. Por esta razón, el índice de conversión de agua en estos procesos, es mayor que el obtenido con otros sistemas.

Este tipo de procesos se caracteriza por su flexibilidad en la operación, dado que los sistemas son capaces de abastecer una descarga constante con una calidad aceptable durante largo períodos sin interrupciones. Por otro lado, estos sistemas están bien adaptados a operación con frecuentes interrupciones y arranques debidos a las variaciones climáticas en el año.

3.4 PRETRATAMIENTO DEL AGUA SALADA

Los procesos de pretratamiento del agua salada estarán relacionados con la necesidad de enviar el líquido libre de todo tipo de sustancias e impurezas que pudieran afectar el desempeño del proceso de desalinización así como la durabilidad de las instalaciones. Cabe señalar que los procesos de pretratamiento en las plantas destiladoras son distintos a los procesos que es necesario llevar a cabo en las plantas que operan con membranas; en los primeros, el factor a vencer será la formación de escamas en las tuberías y recipientes debido a la elevación de la temperatura en el líquido, y, los segundos estarán relacionados con el combate a aquellos elementos que puedan contaminar las membranas.

EXTRACCIÓN POR MEDIO DE COLECTORES RANNEY

Todos los procesos RO requieren agua de alta calidad, con una cantidad de sólidos disueltos relativamente baja. El agua turbia o el agua que contiene una gran cantidad de organismos biológicos requiere un pretratamiento costoso para evitar la contaminación de las membranas. La cantidad de agua producida a partir de la fuente de explotación deberá ajustarse a las necesidades de la planta y deberá ser obtenida de una manera económicamente viable. Las fuentes de agua convencionales suelen ser problemáticas para las plantas que operan con membranas, debido a su turbiedad, productividad biológica, fluctuaciones de temperatura, generando costos de mantenimiento elevados.

Una opción alternativa para abastecer de agua a las plantas RO es la denominada "Colector Ranney" o también conocido como pozo radial. Estos colectores consisten en pozos centrales con una perforación central de 2.7 m o mayor, que contienen una serie de radiales horizontales conectadas al elemento central. El diseño original de este tipo de pozos fue desarrollado por el geólogo Leo Ranney in 1933, la idea original iba dirigida a la explotación de pozos petroleros en regiones con macizos rocosos, y, posteriormente fue adaptado el concepto para explotar agua en acuíferos de arenas y gravas no consolidadas. Este tipo de colectores brinda el primer paso en el pretratamiento, aprovechando las condiciones del subsuelo, haciéndolo funcionar como un filtro que remueve los sólidos suspendidos y los organismos vivos. Este tipo de pozos fue utilizado por primera vez en Inglaterra en 1933, su duración puede ser incluso mayor a los 35 años.

Para que un pozo radial pueda aprovechar al máximo la explotación de los acuíferos, existen tres tipos de condiciones geológicas que requieren distintos conceptos de diseño, y son: 1) sedimentos permeables no litificados, 2) rocas de carbonatos permeables con porosidad secundaria, 3) rocas fracturadas (sedimentarias, ígneas o metamórficas).

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

Los colectores Ranney diseñados para sedimentos permeables deberán localizarse lo más cerca posible de la línea de playa, esto con la finalidad de capturar la mayor cantidad de agua posible. Los colectores más exitosos tienen por lo menos 12.5 m de sedimentos, este espesor es necesario para que la arena pueda actuar como un filtro.

En los diseños clásicos, las radiales se extienden de manera simétrica alrededor del centro, sin embargo, para colectores que captan agua del mar, esta distribución de las radiales es asimétrica y debe apuntar hacia el mar. La longitud de los elementos laterales deberá basarse en la extensión de los sedimentos permeables. Utilizando las técnicas actuales de microtúneles se pueden perforar las radiales a ángulos diferentes de 90° para seguir un lecho de alta permeabilidad. En ciertos casos, el ángulo puede variar para seguir al lecho.

Los colectores Ranney en subsuelos de carbonatos permeables pueden ser adecuados en cuanto al volumen de agua extraída, sin embargo, pueden no proveer el suficiente grado de filtración. En muchos casos, el colector Ranney no es el diseño más económico en suelos constituidos por carbonatos permeables, donde, se pueden utilizar pozos convencionales adecuados para obtener la cantidad de agua requerida y, si son construidos a cierta distancia de la línea de playa, se podrá producir suficiente filtración que permitirá reducir los procesos de pretratamiento. Cuando los estratos son de carbonatos de media o baja permeabilidad, el colector Ranney puede ser una buena opción.

Los acuíferos en mantos rocosos con fracturas, presentan numerosos retos para el diseño de un colector Ranney. La densidad y orientaciones de las fracturas controlan la calidad potencial del agua. Los estudios geológicos de prediseño deberán definir las principales orientaciones de las fracturas. Los laterales del colector deberán ser perforados con una inclinación de 90° medidos a partir de las fracturas.

Además de las consideraciones en el diseño de los colectores Ranney, es sumamente importante tomar en cuenta las consideraciones del agua. Existen fundamentalmente dos aspectos que deberán de cuidarse, el primero, referente a la calidad del agua en el acuífero en la línea de playa y la misma en el lecho subterráneo. Segundo, las variaciones en la calidad del agua marina deberán ser cuidadosamente determinadas.

El asumir que el agua yacente en la línea de playa y el agua cercana a la playa tienen condiciones químicas similares, no siempre es correcto. En ciertas regiones del mundo, el agua bajo la superficie es hipersalina o tiene una química muy diferente que el agua marina. Un ejemplo se encuentra en la costa oeste del Golfo Árabe, donde los sedimentos contienen concentraciones de sulfatos entre 10 y 100 veces mayores. En las costas que tienen manglares, el agua del acuífero contiene niveles de sal muy elevados. En otras ocasiones, el agua de los mantos cercanos al mar contiene elementos que pueden generar problemas en los procesos de membrana, tales como el silicio. Asimismo, grandes concentraciones de ácidos orgánicos, como el ácido tánico, pueden causar problemas de pretratamiento. También deberán tomarse en cuenta los gases disueltos.

Existen dos problemas principales referentes a la calidad del agua que pueden afectar al colector Ranney. El primero, al existir una prolongada concentración de sólidos suspendidos en

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

la columna de agua, así como una acumulación continua de materiales finos en la vecindad, se obstaculiza el flujo del líquido, generando una caída en la extracción. La acumulación de finos se presenta en el mar con poca frecuencia, dada la turbulencia presente, sin embargo, en regiones laguneras y estuarinas, la acumulación de limo es muy común, por lo que, los colectores Ranney no son recomendados en estos casos.

El segundo problema consiste en la precipitación química de los sedimentos que se adhieren a las paredes, ya que puede reducir la permeabilidad y por tanto la capacidad de extracción del sistema. La precipitación más común es la de carbonato de calcio, el agua marina se encuentra comúnmente sobresaturada de esta sustancia, sobre todo en las regiones tropicales, por lo que, se deberán de realizar los estudios correspondientes para determinar la presencia de dicha sustancia.

PRETRATAMIENTO DEL AGUA EN PLANTAS QUE OPERAN CON MEMBRANAS

En el caso de las plantas que operan con membranas, el pretratamiento consistirá en la reducción de los elementos que ensucian dichas membranas, presentes en el agua entrante, a niveles que puedan lograr un desempeño estable y duradero. En los sistemas de ósmosis inversa, la contaminación de las membranas se puede deber a la presencia de materia presente en forma coloidal o como partículas suspendidas y disueltos orgánicos, dando como resultado, un crecimiento biológico en el sistema.

La formación de escamas de materia inorgánica, frecuentemente encontrada en los elementos inmediatos a la alimentación en plantas de agua subterránea, no suele presentarse en los sistemas que son alimentados por agua marina superficial. La precipitación de sales solubles en el concentrado es poco frecuente dada la tasa de recuperación relativamente baja, fuerza ionizante elevada y baja concentración de iones de bicarbonato. La contaminación de la membrana debido al crecimiento de elementos orgánicos se suele presentar en aquellos elementos que encabezan el sistema.

Investigaciones recientes han revelado que la contaminación de sustancias coloidales es acelerada por fuerzas iónicas altas así como por las fuerzas debidas al flujo. El flujo del permeado fuerza a las partículas coloidales y a las macromoléculas orgánicas hacia el interior de los poros de la membrana. En aplicaciones que utilizan agua marina, la combinación de fuerzas iónicas elevadas y la presencia de partículas inorgánicas resulta en una tasa mayor de contaminación que para el agua subterránea. El proceso de contaminación afecta el rendimiento de la membrana tanto en el flujo producido, como en la cantidad de agua que pasa a través de la membrana. La contaminación por partículas o materia biológica resultará en el bloqueo de los canales de alimentación y en un incremento en la caída de presión.

La efectividad de la operación en los sistemas de pretratamiento y calidad del agua de alimentación es medida en términos del Índice de Densidad de Sal, que será la medida de la filtrabilidad del agua entrante a través de la membrana de una cierta porosidad definida en la membrana. Usualmente un filtro con un tamaño de poro nominal de 0.45 micras se utiliza. El

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

valor de dicho índice brinda sólo una referencia relativa de la calidad del agua entrante. No existe una relación bien definida entre los valores de este índice, la tasa de contaminación de la membrana o el rendimiento a largo plazo de la membrana. La mayoría de los fabricantes de membrana, especifican un límite superior del índice de 4 a 5. Sin embargo, para desempeños de la membrana más estables, el valor promedio deberá de estar debajo de 3.

El pretratamiento convencional de un sistema que utiliza agua marina superficial se describe esquemáticamente en la Figura 3. 3. Pretratamiento convencional del agua marina superficial. Consiste en un punto de cloración, hasta un valor de 0.5 a 1.0 partes por millón, seguido de una coagulación y floculación en línea. Las partículas coloidales son removidas en dos etapas por medio de filtros. La primera consiste en un filtro grueso, donde las partículas más grandes quedan atrapadas, mientras que la segunda, consiste en un filtro más fino. Esta configuración es efectiva para producir una calidad de agua más consistente que se pueda mantener a lo largo de los cambios estacionales. Después de los filtros y antes de la filtración por cartucho, se agregarán el inhibidor de escamas así como bisulfito de sodio.

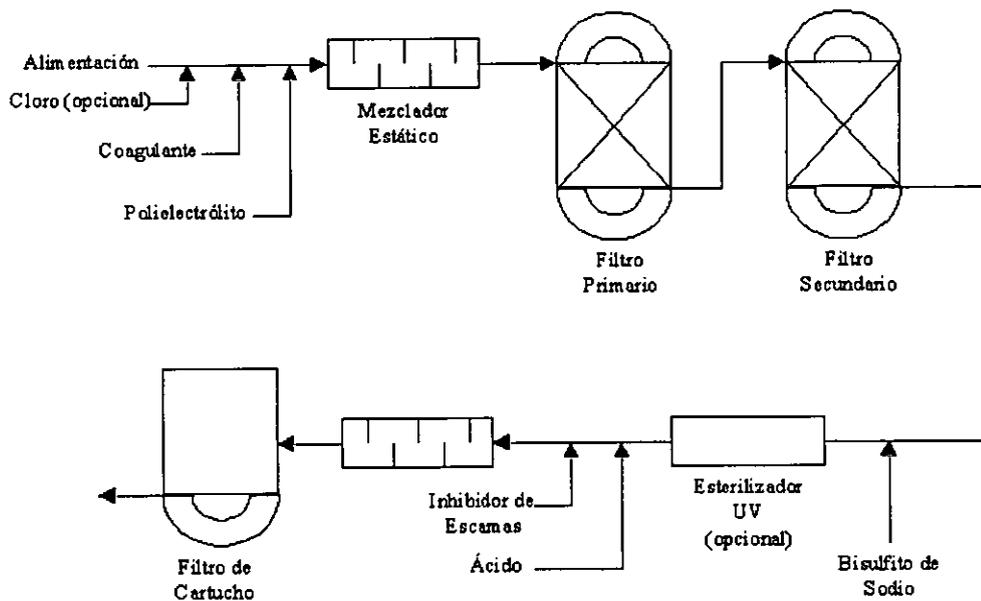


Figura 3. 3. Pretratamiento convencional del agua marina superficial

El uso de membranas como una barrera en los procesos de pretratamiento, ha sido propuesto en el pasado. Las membranas de ultrafiltración y microfiltración tienen la habilidad de pretratar el agua llevándola a niveles de mejor calidad que los obtenidos con los filtros de medio y de cartucho, sin embargo, la configuración convencional de espiral en los elementos de membrana no se ajusta al pretratamiento de agua superficial con rangos elevados de contaminación. Los elementos de ultrafiltración no pueden operar a elevadas tasas de flujo sin contaminarse severamente.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

Las nuevas tecnologías de microfiltración y ultrafiltración recientemente lanzadas al mercado, se basan en una membrana con muy alta capilaridad, los materiales empleados son polipropileno, poliéter sulfatado o acetato de celulosa. Esta tecnología ha sido probada exitosamente en un gran número de sistemas. Después del éxito alcanzado en las aplicaciones de agua potable, la tecnología de capilaridad ha sido propuesta y probada como un pretratamiento potencial para sistemas de ósmosis inversa cuya alimentación consista en agua marina superficial con gran cantidad de materia orgánica e inorgánica.

Adicionalmente a los problemas comentados, existen algunas regiones donde el agua marina tiene una gran cantidad de silicio. La poca solubilidad del silicio ha limitado el uso eficiente en los procesos de ósmosis inversa. Hasta hace algunos años, la regla establecía que las concentraciones en sistemas de ósmosis inversa debería estar limitada a 150 mg/l en cuanto a óxidos de silicio. En los últimos cinco años, el uso de tecnología basada en polímeros de alta capacidad de dispersión ha aumentado los niveles. Sin embargo a la fecha, ninguna de las técnicas aplicadas a sistemas de tratamiento de agua, ha controlado de manera eficiente la polimerización del silicio, las supersaturaciones (más de 550 mg/l SiO₂) así como la dispersión de materia coloidal.

Estudios recientes han revelado que es posible operar sistemas de membrana con niveles de silicio significativamente más altos que los actualmente aceptados en las normas mundiales. Existen diversos inhibidores en el mercado que han probado ser efectivos en los rangos de 200 a 240 mg/l. Sin embargo, sólo unos cuantos sistemas operan con estos niveles de silicio. Aún cuando se utilicen inhibidores, será importante seguir las siguientes recomendaciones:

- *Análisis del agua de una manera regular. Se han observado cambios sustanciales en los contenidos de silicio.*
- *Contar con un margen de seguridad. Nunca operar en los límites. Regularmente los propietarios de las plantas tratan de sacar mayor provecho a sus sistemas, nunca lo hacen a la manera inversa.*
- *Tener la certidumbre de que el antiescalante/anticontaminante es utilizado bajo las recomendaciones del fabricante. La experiencia ha probado que el aumentar las dosis de dichos inhibidores en un 20% permite un ahorro a largo plazo dado el incremento en la durabilidad de las membranas (elementos sumamente costosos).*
- *Circular agua limpia en todos los componentes cuando se requiera detener la operación. Se deberá de comprobarse que todas las sales hayan sido removidas del sistema.*
- *Utilizar filtros en la etapa de pretratamiento que reduzcan al máximo los sólidos disueltos.*
- *Aunque se desconoce el funcionamiento de los inhibidores de silicio, es necesario prevenir la coprecipitación debido a las sales férricas, carbonato de calcio y sulfato de calcio.*
- *Limpieza de membranas oportuna. La presencia de cualquier depósito que se encuentre en áreas de flujo escaso promoverá la precipitación del silicio.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

- *Monitoreo cuidadoso de la operación. Se deberán tomar medidas oportunas en aquellos eventos donde exista un decremento en el rendimiento de la planta. En la acumulación de silicio es muy importante tomar acciones oportunas, dado que aquellas membranas bloqueadas con silicio no pueden ser limpiadas.*

Resultados de pruebas piloto con relación a un nuevo control de formación de polímeros de silicio con la ayuda de un producto denominado "F", han arrojado como resultado, una inhibición en la polimerización del silicio hasta de la doceava parte durante cinco horas. Dado que la permanencia en los sistemas de ósmosis inversa sería mucho menor a ese lapso, este producto podría prevenir la polimerización del silicio en sistemas de ósmosis inversa. También dichos estudios arrojaron que la presencia de material suspendido no impactaba adversamente la influencia del Producto F en la inhibición. El Producto F mostró propiedades de dispersión de óxido de hierro, comparables a los productos comerciales que se utilizan para la prevención de formación de escamas y de contaminación en los sistemas de ósmosis inversa. Las pruebas indicaron que dicho producto minimiza la contaminación por silicio en rangos mayores a los 600 mg/l de SiO₂ en la corriente del concentrado.

ACUMULACIÓN DE SEDIMENTOS EN PLANTAS DESTILADORAS

La acumulación de escamas minerales en las superficies metálicas es y ha sido un problema crítico en todos los trabajos relacionados con el tratamiento de agua. Tomando en cuenta los procesos de desalación, la acumulación de escamas en los diversos componentes de una planta desalinizadora, reducen su eficiencia total e incrementan el costo de operación. En los evaporadores MSF, la formación de escamas en los tubos intercambiadores de calor, reduce los coeficientes de transferencia de calor así como las tasas de flujo.

Las sedimentaciones minerales pueden clasificarse en dos grandes categorías: escamas alcalinas tales como carbonato de calcio e hidróxido de magnesio y escamas no-alcalinas como sulfato de calcio y silicio.

Las formaciones alcalinas regularmente se deben a la descomposición de los constituyentes de los bicarbonatos. En realidad, la tasa de descomposición de los bicarbonatos y distribución de la alcalinidad está gobernado por diversos parámetros relacionados tanto a la compleja composición del agua marina como a los propios procesos de desalinización. La presencia de cationes divalentes en el agua marina, incluyendo calcio, magnesio y algunas trazas de metales, puede producir diversas tasas de descomposición. Mas aún, en los procesos de desalinización y en particular en los procesos MSF, el procesamiento del agua marina bajo condiciones de vacío y altas transferencias de calor, puede afectar también a las tasas de descomposición de los bicarbonatos.

Emulando los procesos de las destiladoras MSF se ha logrado determinar que en la primera etapa, denominada etapa de calentamiento, que se da a la presión atmosférica y la temperatura alcanza lo 90° C, menos de un 1% de los bicarbonatos se descomponen. Esto es debido a que se encuentran en equilibrio con el bióxido de carbono presente. Consecuentemente, este periodo no es considerado como parte del problema de acumulación de escamas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

Una vez que la solución alcanza una temperatura que se encuentra 2 o 3° C encima de los 90° C, la bomba de vacío comienza a operar, la válvula de alivio se abre gradualmente hasta que una ebullición visible se detecta en la superficie de la solución. La temperatura de la solución usualmente cae hacia los 90° C \pm 1° C. El momento en el que la ebullición se presenta es considerado como el comienzo de la reacción, donde la solución estará refluyendo por 30 minutos.

De la totalidad del HCO_3 presente en el vaso, un 41% ha hecho reacción al haber alcanzado los 250 milibares de presión de vacío, lo que demuestra que el vacío por sí mismo es un factor muy importante en la descomposición de los carbonatos. Durante el periodo de calentamiento justo antes de aplicar el vacío, la solución dentro del tanque se encuentra casi en un sistema cerrado. Debido a la descomposición de los bicarbonatos durante este periodo existe un crecimiento de la presión parcial del bióxido de carbono dentro del recipiente que mantiene un equilibrio entre el bióxido de carbono encima de la superficie de la solución y el del interior de la solución.

A la luz de las investigaciones anteriores, se puede esperar que se den cambios sustanciales en la química que tendrán lugar en las cámaras de ebullición en las plantas MSF. En otras regiones de este tipo de instalaciones como en los tubos de intercambio de calor y en la sección de recuperación de calor, la salmuera se encuentra en un sistema prácticamente cerrado y el dióxido de carbono permanecerá en equilibrio con los bicarbonatos. En resumen, en las cámaras donde se da el proceso de ebullición, se encuentra el origen de la formación de las escamas que se generan en los tubos por donde es recirculada la salmuera.

De manera similar, el efecto de la cantidad de flujo de calor ha sido también investigado y se ha determinado que el incremento en el flujo de calor resulta en un incremento en la tasa de descomposición de los bicarbonatos. La máxima conversión de los bicarbonatos se logra en la condición de mayor calentamiento. Basado en lo anterior, resulta claro que diferentes materiales en las plantas MSF causarán diferente tasa de descomposición resultando de los diferentes coeficientes de conductividad térmica.

La caída en la concentración de los bicarbonatos es acompañada por un incremento en la concentración de carbonatos que alcanza su máximo a los 90 minutos. Durante los primeros 90 minutos, la concentración de carbonatos en la solución final es solo la mitad de la cantidad del bicarbonato descompuesto, lo que significa que por cada dos moles de bicarbonato que desaparecen de la solución habrá un mol de carbonato formado. La otra mitad de la cantidad de bicarbonatos descompuestos será liberada de la solución como bióxido de carbono. Finalmente la formación de hidróxidos en la solución, toma lugar solo a través de la hidrólisis del carbonato. Por cada mol de carbonato hidrolizado, dos moles de hidróxido se formarán.

Los resultados implican primeramente que la cantidad exacta de bicarbonato descompuesto y consecuentemente la generación de sedimentos, dependerá de la tasa de flujo de calor. Mas aún, bajo condiciones de un flujo de calor elevado y una generación de vacío, los periodos observados para la descomposición de bicarbonatos dependerán del tiempo de residencia de la salmuera en los diversos elementos de una planta MSF. Por supuesto que la tasa de descomposición de los bicarbonatos, también se verá afectada por la presencia de Ca^{2+} , Mg^{2+} y otros elementos. Estos factores adicionales están captando la atención de los investigadores.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

El efecto de la presencia de algunos antiescalantes en la tasa de descomposición de los bicarbonatos ha sido ampliamente investigado. Los aditivos comercialmente denominados PCA, PMA y PPN han sido estudiados de manera separada. Los resultados en las investigaciones demuestran que la tasa de descomposición de bicarbonatos no se ve afectada por la presencia de estos aditivos. Más aún, no hay una interacción posible entre los aditivos y los elementos alcalinos. Esta observación brinda una confirmación clara del papel que tienen los aditivos en los procesos de inhibición de sedimentos.

En resumen, los estudios han generado evidencia que determina que la descomposición de los bicarbonatos se da primero en carbonatos, para después realizarse la conversión de carbonatos en hidróxidos. También se concluye que el papel del flujo de calor y el vacío aplicado ha sido demostrado en lo referente a la descomposición de los bicarbonatos. Para finalizar, se ha determinado que la descomposición de los bicarbonatos no se ve afectada por la presencia de inhibidores en la formación de escamas.

Los policarboxilatos han tenido éxito en la inhibición de acumulación de escamas. Por más de quince años han sido utilizados en plantas desalinizadoras de agua marina. Este tipo de sustancias previene la formación de escamas debidas a las sales contenidas en agua, sobre todo en las tuberías donde se da el intercambio de calor y en los filtros de las membranas.

Los inhibidores de escamas deberán tener la suficiente estabilidad térmica, y deberán ser capaces de prevenir que las sales del agua dura se depositen. También deberán tener la capacidad de dispersar cualquier cristal o cualquier tipo de sólidos suspendidos que pudiera existir. Otra característica que deberán cumplir, dado que serán utilizados en la producción de agua potable, será que no deberán representar ningún riesgo para la salud. Adicionalmente no deberán generar efectos en el medio ambiente cuando sean descargados al mar junto con el concentrado.

Algunos tipos de estos polímeros son los fosfonatos y los trifosfatos. El uso de los trifosfatos ha disminuido debido a que sus enlaces son rotos muy rápido por la hidrólisis en temperaturas elevadas. Al romperse se convierten en ortofosfatos, que tienen difícilmente algún efecto en la dureza de las sales. Los trifosfatos sólo son utilizados en sistemas que funcionen con bajas temperaturas.

A diferencia de los trifosfatos, los fosfonatos son excelentes inhibidores, pero tienen la desventaja de ser monoméricos, lo que significa que son ineficientes como agentes dispersores. Los policarboxilatos ofrecen la ventaja de ser buenos inhibidores de escamas y dispersores de sólidos suspendidos de manera simultánea. Los policarboxilatos son los más utilizados para desalinizar agua marina, dado su efectividad en la prevención de los depósitos de escamas formados por sales de agua dura y son extremadamente efectivos como agentes dispersores de sólidos suspendidos.

El agua marina tiene un contenido de sales disueltas de entre 36,000 a 45,000 ppm, dependiendo de su origen. Los principales aniones contenidos en el agua marina son cloro, sulfatos y bicarbonatos; los cationes predominantes son calcio, magnesio y sodio. La formación de depósitos se debe principalmente al carbonato de calcio, hidróxido de magnesio y sulfato de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

calcio. Algunas teorías establecen que el carbonato de calcio y el hidróxido de magnesio son formados por los iones de bicarbonato que son liberados en la descomposición térmica al incrementarse las temperaturas. Los iones de bicarbonato pueden actuar inmediatamente con el calcio para formar carbonato de calcio; también pueden reaccionar con el agua para formar iones de hidróxidos que a su vez reaccionan con el magnesio, formando hidróxido de magnesio. El carbonato de calcio es formado a temperaturas de 82° C, mientras que el hidróxido de magnesio es formado a temperaturas mayores. El sulfato de calcio es formado a temperaturas que exceden los 110° C.

Los polímeros utilizados en la inhibición de escamas tienen la habilidad de combatir las superficies de los núcleos cristalinos microscópicos; esto previene el crecimiento a futuro, o, por lo menos, retrasa sustancialmente dicho proceso. La acción dispersora de los polímeros, asegura que los cristales microscópicos suspendidos permanecen divididos en el agua.

Los primeros trabajos que se realizaron en la síntesis y polimerización de los monómeros acrílicos comenzaron en 1929, en los inicios de la ciencia de los polímeros. Tomando el ácido acrílico como un ejemplo, se puede observar que la reacción de polimerización depende de los radicales libres como iniciadores. En propagación de reacción en cadena, los ácidos acrílicos se enlazan a los radicales libres al final de la cadena, lo que eventualmente conducirá a la formación de macromoléculas de ácido poliacrílico.

Los estudios han demostrado que el ácido polimaléico es efectivo al añadirse en cantidades pequeñas, es económico y amigable con el ambiente.

3.5 CONSUMO DE ENERGÍA PARA LA DESALINIZACIÓN

El objetivo de lograr ahorros sustanciales en el consumo de combustibles es deseable, no solo por la futura escasez de los combustibles fósiles y el daño al ambiente. También es deseable por la creciente demanda de agua pura y su decremento en disponibilidad en mantos naturales. La termoeconomía es una herramienta de análisis que ayuda a lograr este objetivo.

La termoeconomía comenzó a desarrollarse en los años sesenta. Los procesos de desalinización de agua marina fueron los primeros en ganar lugar. La termoeconomía ha sido desarrollada con una herramienta de análisis que será de ayuda para sintetizar la configuración de un sistema energético y mejorar los parámetros de diseño de la configuración. La segunda ley de la termodinámica es el núcleo de todas las formulaciones, lo que permitirá el mejoramiento en la optimización en los parámetros de diseño del sistema dada una función de costo objetivo.

Conceptos mencionados en el capítulo II como "plantas de doble propósito" y "plantas híbridas" serán de gran trascendencia en la formulación de tecnologías que permitan el ahorro en el consumo de energía. Si consideramos una planta desalinizadora híbrida que a su vez estará acoplada a una planta termoeléctrica, podremos aprovechar la energía producida en esta última para la obtención de agua potable. Cuando la termoeléctrica requiere cubrir las demandas eléctricas en horas pico, será posible poner en funcionamiento la destiladora, aprovechando el vapor remanente que es producido en la termoeléctrica, pero que por su baja temperatura no se

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

puede utilizar en el movimiento de los generadores. Por otro lado, cuando no haya una demanda elevada en el consumo de energía, se podrá aprovechar una porción de la energía eléctrica producida en la termoeléctrica para mover las bombas que pondrán en funcionamiento a la planta que funcione con membranas.

Tanto las plantas destiladoras como las plantas de membrana han sufrido mejoras notables en los últimos años en lo referente a sus diseños, lo que ha colocado a los procesos de desalinización muy cerca de los demás procesos.

El mercado en la actualidad, ofrece equipos cuya eficiencia es muy alta; en el caso de las plantas de ósmosis inversa, se puede lograr una eficiencia del 83% en la bomba y turbinas recuperadoras de energía. Para los motores eléctricos, se puede considerar una eficiencia del 93%. Por ejemplo, en las plantas de ósmosis inversa, el efecto de una tasa de recuperación elevada y tasas elevadas de flujo, se traducirán en una reducción significativa en los costos de inversión. Estos ahorros son transferidos al costo total del agua. Sin embargo, la alta tasa de recuperación y una tasa de flujo de permeado elevada, requerirán una presión de alimentación también elevada.

En épocas recientes, la tasa de recuperación para sistemas comerciales de ósmosis inversa ha estado incrementándose según la disponibilidad en el mercado de elementos de membrana que puedan rechazar la sal con mayor eficiencia. En la actualidad, la máxima tasa de recuperación en sistemas alimentados por agua marina, ha sido limitada por la capacidad de rechazo de la sal de las membranas, así como la llegada al límite permisible para agua potable. Como es de esperarse, una tasa de recuperación elevada, requiere operación a una tasa de flujo promedio, mayor que los valores estandarizados. Esto para mantener una salinidad del permeado aceptable, especialmente durante los periodos de altas temperaturas en el agua de alimentación. Los cuestionamientos consisten en: ¿qué tasa de recuperación es óptima para sistemas de agua marina respecto al costo del producto?, ¿dicha tasa puede ser lograda dentro del rendimiento actual de las membranas comerciales?, y por último ¿es posible operar membranas para agua marina superficial a mayores tasas de flujo?.

Existe otro factor que ha sido clave para la difusión de estas tecnologías, dicho factor consiste en la utilización de una bomba de alimentación de alta presión (como el principal consumidor de energía) y, muy especialmente, la recuperación de la energía de alta presión que es regresada dentro del sistema.

Los dispositivos de recuperación de energía dependerán del tamaño de la planta, a continuación se describen los dispositivos usados para diversos tamaños de plantas.

- *Para plantas con capacidad es menor a los 1500 m³/día, sólo se utiliza una bomba de alimentación.*
- *Para plantas cuya capacidad oscila entre los 1500 y los 4000 m³/día, se acostumbra utilizar una bomba de alimentación y bombas reversibles para la recuperación de energía.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

- *Para plantas mayores se aplica el concepto anterior, pero con una bomba de alimentación más eficiente y recuperación con bombas reversibles, o bien, una bomba de alimentación con alta eficiencia y para la recuperación de energía una turbina tipo Pelton.*

En el pasado se solía utilizar bombas reversibles, pero, para grandes flujos, la turbina Pelton es significativamente más eficiente, además, su rango de eficiencia es mayor, por lo que a largo plazo se convierte en una opción económicamente más rentable.

Las plantas de ósmosis inversa se construyen en trenes que están formados por una bomba de alimentación y una turbina de recuperación, lo que maximiza la estandarización del equipo y lo convierte en una opción fácil de ajustar a las necesidades específicas de cada proyecto.

En el mercado actual, existen diversos fabricantes que ofrecen equipamientos que incluyen una bomba con una turbina, estos diseños ofrecen como ventajas principales, el contar con dos equipos ensamblados en uno, reducción del espacio utilizado, mayor eficiencia total del sistema, reducción de costos por ahorros en la tubería y ajustes, alta eficiencia de la turbina Pelton en un rango más amplio, así como menos componentes. Este tipo de arreglos puede lograr hasta una recuperación del 44% de la energía consumida por la bomba.

No sólo se han logrado avances en el mejoramiento del consumo de combustibles en las plantas que operan con membranas, en los métodos de destilación también se han logrado avances significativos, particularmente en los métodos de evaporación por efectos múltiples (MED). La mayor parte del trabajo publicado referente a los procesos MED consiste en comparativos respecto a los procesos MSF. Darwish y El-Dessouky (1996) mencionan que la competencia en la segunda generación de plantas desalinizadoras, se dará entre las MED de tubería vertical y las de ósmosis inversa. El proceso MED es más eficiente, desde el punto termodinámico y de transferencia de calor, que el predominante proceso MSF. La energía requerida para el bombeo, así como el área de transferencia de calor son cerca del 20% y el 50% de las requeridas por las plantas MSF respectivamente. Aunado a lo anterior, en lugar de las 24 etapas que suelen utilizar las plantas MSF, con sólo 10 efectos en las plantas MED, se puede lograr un desempeño similar. Consecuentemente, el capital invertido para la construcción de una planta MED se espera que sea un 50% menos que el utilizado por un sistema MSF. Por si fuera poco, estudios recientes han demostrado que los procesos MED requieren sustancialmente menos superficie de transferencia de calor comparados con los procesos MSF si la temperatura tope de la salmuera se incrementa.

En resumen, los costos totales permiten un ahorro global de más del 20% por cada litro de agua producido, al utilizar plantas de efecto múltiple (MED) en lugar de destilación en etapas múltiples (MSF).

En la actualidad los gobiernos de diversas naciones así como la iniciativa privada, han implementado innovaciones en los diseños de plantas de efecto múltiple, entre estos diseños destaca el propuesto por la Fundación de Ciencia y Tecnología Americana-Israelí en conjunción con el Distrito Metropolitano de Agua del Sur de California, donde se propone una planta de demostración con una producción diaria de 48,000 metros cúbicos (un poco más de medio metro cúbico por segundo). Las innovaciones principales que ofrece esta nueva tecnología son:

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO III. CONSTRUCCIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PLANTAS DESALINIZADORAS

- *Configuración vertical de los procesos MED.*
- *Contenedor en forma de vaso consistente en un cascarón de concreto.*
- *Evaporador doble de aluminio en forma de flauta, orientado verticalmente.*
- *Mecanismo mejorado para la transferencia de calor en la película de descenso del líquido.*
- *Pretratamiento especial del agua entrante para permitir temperaturas de hasta 113°C.*

Las características anteriores permiten el diseño de plantas con capacidades de 284,000 metros cúbicos diarios o incluso mayores, en contraste con las capacidades de las plantas de efecto múltiple actuales cuyas capacidades máximas son de aproximadamente 20,000 metros cúbicos diarios. Económicamente, las plantas MED verticales son costeables en capacidades mayores a los 48,000 metros cúbicos diarios. Sin embargo, en condiciones particulares, como pudiera ser en regiones donde el costo de los predios es elevado, este tipo de plantas pueden resultar atractivas para producciones menores. Las ventajas que este diseño ofrece sobre sus demás competidores son:

- *Índice de economía de 50% mayor que el de las unidades MED horizontales.*
- *Superficie en planta entre 5 y 10 veces menor, comparado a los otros procesos. Esto permite la construcción de plantas de gran capacidad en zonas densamente pobladas.*
- *Costos de capital relativamente bajos comparado con los demás procesos.*
- *Costo de consumo de energía relativamente menor, así como baja demanda de consumibles.*
- *Fácil acoplamiento de la planta desalinizadora con una estación de poder nueva o existente.*

Los avances logrados en las tecnologías de desalinización por destilación y membrana, han abierto nuevos horizontes en las expectativas de las naciones del tercer mundo cuya capacidad de inversión y financiamiento es menor, logrando de esta forma hacer el vital líquido más accesible en cantidad y calidad a los pueblos que más lo requieren.

El abatimiento en los costos de producción de agua potable a partir de agua salada, ha sido posible gracias a un constante mejoramiento en los dispositivos consumidores de energía. Dado que una gran parte del costo de producción está relacionado con la cantidad de energía, cualquier mejora en la eficiencia de los procesos, se reflejará inmediatamente en un producto más accesible al consumidor final.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

4 CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

La infraestructura que provee agua potable, recolección y disposición de residuos sólidos así como los servicios de control de contaminantes para las ciudades incluye, extensas obras de captación, tuberías, sistemas de tratamiento, estaciones de bombeo e instalaciones para disposición de desperdicios. Estos trabajos que llevan a cabo los municipios tienen dos propósitos: proteger la salud de la población y cuidar la calidad del ambiente. El tratamiento del agua potable ayuda a la prevención de brotes de enfermedades adquiridas por la ingestión del vital líquido, como son el cólera, disentería y fiebre tifoidea así como el tratamiento y disposición de residuos sólidos previene la degradación de los ecosistemas. De manera similar, la limpieza del aire de gases contaminantes y partículas, previene los efectos adversos tanto en la salud del género humano como en la calidad del ambiente.

El crecimiento sostenido de la población, la urbanización y el desarrollo industrial, producen incrementos constantes en la demanda de la infraestructura, estas demandas crean una necesidad de planeación, diseño y construcción de nuevos trabajos relacionados con el ambiente. Debido a que la provisión, operación y mantenimiento de estos trabajos requiere una mayor inversión de los fondos públicos, es de la incumbencia de los ciudadanos así como de los funcionarios municipales la toma de decisiones en lo referente a los trabajos tecnológicos para preservar el ambiente. Es por ello, que será necesario considerar todos los elementos que nos permitan un ahorro en los consumos de energéticos, dado que la generación de energía depende de la quema de grandes cantidades de combustibles fósiles.

En las plantas desalinizadoras se utilizan principalmente dos tipos de energía: energía calorífica y energía eléctrica; la primera es utilizada por aquellas plantas que involucran procesos termodinámicos al producir un destilado; la segunda será utilizada por todas las plantas, dado que será fundamental la utilización de bombas propulsadas por motores eléctricos para la movilización del vital líquido.

4.1 MANEJO DEL REMANENTE O SALMUERA

El elemento común en todos los procesos de desalinización es la producción de una corriente de concentrado (también llamada salmuera, residuo o corriente de desperdicio). Esta corriente contiene las sales que han sido removidas del agua entrante para producir agua dulce, así como algunos químicos que han sido vertidos en el proceso. Dicha descarga varía en su volumen dependiendo del proceso, sin embargo siempre será una cantidad significativa de agua.

El manejo de este remanente, de una manera que se reduzca al máximo el impacto ambiental, es una parte sustancial de la factibilidad y operación del proyecto. Si la planta desalinizadora se encuentra cerca del mar, el potencial del problema será considerablemente menor debido a que el mayor contaminante en la corriente de concentrado es precisamente la sal, y su retorno al mar, generalmente no representa mayor dificultad. Aunado a lo anterior, se deberá tener

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

cuidado con los posibles problemas generados por la adición de otras sustancias, la modificación en la cantidad de oxígeno disuelto y en la temperatura del agua.

El potencial de un problema mayor se da cuando la planta desalinizadora se encuentra en territorio continental, lejos de cualquier cuerpo natural salado. Se deberá tener sumo cuidado para no contaminar el agua superficial o subterránea con las sales liberadas en el concentrado y no degradar el medio ambiente, dado que grandes concentraciones de sal pueden afectar adversamente a la flora y fauna existentes. El manejo puede involucrar disolución, inyección del concentrado en un acuífero salino, evaporación o transportación a través de tubería a un punto adecuado. Todos los métodos anteriores pueden incrementar el costo del proceso.

El significado del manejo adecuado del concentrado deberá de ser uno de los aspectos que primero se deberán de investigar en cualquier estudio de factibilidad para un proyecto de desalinización. El costo del manejo de los residuos puede resultar significativo y puede afectar adversamente el financiamiento del proyecto.

CASO PRÁCTICO

En el presente apartado, se presenta un caso que puede resultar de interés para el cuidado del entorno ecológico; particularmente se hablará de la planta Al Taweelah, ubicada en los Emiratos Árabes Unidos, este proyecto funciona para generar electricidad (termoeléctrica) y también como planta desalinizadora.

La corriente de desperdicio de esta planta, compuesta fundamentalmente por agua marina con temperatura y salinidad elevadas, anteriormente era descargada en la laguna Ras Hanjurah, a través de canales abiertos con una longitud total de 3 kilómetros. Al paso del tiempo, se observó que la temperatura, nivel y salinidad en la laguna, habían sufrido un incremento notable. La decoloración de los mangles confirmó la sospecha del daño que estaba produciendo la descarga.

El daño generado a los mangles, flora y fauna de la laguna sufrió un incremento mayor cuando la planta Al Taweelah llegó a su capacidad de operación máxima y más aún cuando se aumentó la capacidad de operación de la planta, llegándose a incrementar la temperatura en la laguna más de 6° C y la salinidad más del 2 al millar.

Para evitar mayores daños y poder efectuar una rehabilitación de los mangles, así como restablecer el funcionamiento ecológico marino de la laguna, el Departamento de Agua y Electricidad del Gobierno de Abu Dhabi decidió reubicar la corriente del concentrado directamente descargando en el mar.

Los estudios que guiarían la reubicación siguieron las siguientes directrices:

- 1. Para determinar la ubicación, tipo y distribución de la descarga, así como la operación de la planta en el presente y futuro, se debería contemplar que la vecindad de la descarga no se viera afectada adversamente por la circulación de calor y salinidad excedentes.*
- 2. Llevar a cabo el diseño hidráulico de la configuración de descarga, así como predecir su impacto en la costa.*

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

3. Realizar el estudio de impacto ambiental referente a la descarga del concentrado en el mar y proponer las medidas necesarias para mitigarlo en caso de ser considerable.

Es importante tener en cuenta la relación que existe entre el diseño hidráulico y el estudio de impacto ambiental.

El efluente del concentrado tendería a incrementar la temperatura y salinidad del agua marina ubicada en la vecindad de la descarga. Por una parte, la mezcla y la disolución de la sal y el calor descargado en el entorno marino estarán sujetas a las condiciones hidrodinámicas marinas. Por otro lado, las condiciones hidrodinámicas estarían influidas por la descarga del efluente, así como por la configuración de la estructura de dicha descarga. De esta forma, un modelo hidrodinámico integrado, una recreación del calor y salinidad, un modelo de la morfología de la costa y un estudio de impacto ambiental, deberán realizarse para cumplir con los objetivos del estudio.

Modelo Hidrodinámico.

Fue realizado con un modelo detallado de dos dimensiones considerando los flujos y reflujos de la marea, anidado dentro de modelos regionales mayores. Una inspección de campo detallada fue realizada para obtener la información necesaria para calibrar dicho modelo. El modelo cubre el área de la costa enfrente de la planta y parte de la laguna Ras Sadr. Más allá de la superficie emergida, el modelo está limitado por una línea paralela a la costa. La resolución de la malla varía, la mayor se encuentra en la laguna Ras Hanjurah con un tamaño de malla menor a los 50x50 m. El modelo abarca un área de aproximadamente 22x15 km, está compuesta por una malla de 111x78 elementos, con aproximadamente 5,800 puntos computables

Modelado de Salinidad y Temperatura

La dispersión de calor y sal, así como el modelo de recirculación, serán integrados al modelo hidrodinámico en un modelo de tres dimensiones que se encontrará anidado. El modelo de difusión del efluente de descarga, toma en cuenta la densidad inducida por la corriente de descarga. Los coeficientes de difusión vertical local dependientes del tiempo son calculados utilizando un modelo de turbulencia que considera las velocidades locales del flujo, los gradientes de velocidad y los gradientes de densidad. La resolución de la malla varía poco, su mayor resolución se encuentra a lo largo de la costa, en las vecindades de la salidas, con un tamaño de elemento de 130x110 m. El modelo cubre un área de aproximadamente 15.5x12.4 km y cuenta con una malla horizontal de 73x45 elementos, con aproximadamente 2,250 puntos activos para ser calculados. En la dirección vertical se utilizan 7 capas, cuya distribución es de 5, 10, 15, 15, 20 y 20% de la profundidad del agua. El espesor de las capas varía de acuerdo al nivel del agua.

El modelo está equipado con un módulo de transporte de calor: el calor excedente es transportado de la superficie del agua a la atmósfera, por medio de evaporación, por radiación de longitud de onda larga y por convección. El coeficiente de transferencia de calor aplicado, dependerá básicamente de la temperatura del agua y de la velocidad del viento.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

Condiciones de frontera en el estudio hidrodinámico

En el estudio, cierto número de alternativas para la ubicación fue investigado desde el punto de vista de la recirculación de los excedentes de temperatura y salinidad en la corriente de descarga. Basada en la información recolectada, las condiciones que se presentan a continuación se aplicaron al modelo:

- *Condición de máxima descarga*
- *Consideración de las condiciones climatológicas más adversas en el verano (mareas bajas, sin viento)*
- *Temperatura del agua marina de 35° C*
- *Salinidad del agua marina del 45 al millar*
- *Descarga de 100 m³/s, incremento de temperatura de 6° C, incremento de salinidad de 2 al millar*

Estudio de Impacto Ambiental

Dentro de los estudios, se encuentra el estudio de impacto ambiental, que describirá lo concerniente al estado ecológico de las cercanías de la descarga en el presente y futuro. Las actividades se dirigirán a la revisión y extensión de la información disponible de los hábitats así como de las especies clave en el ecosistema (en este caso mangles y vegetación acuática superficial). La cuantificación de los requerimientos mínimos se basará en la incorporación de los resultados de los modelos hidrodinámicos y de dispersión que deberán arrojar curvas de conveniencia para los parámetros físicos más relevantes. El estudio cuantificará y establecerá la mejora del hábitat una vez ubicada la descarga del concentrado.

El género Avicennia (conocido comúnmente como mangle) contiene cerca de 15 especies que crecen a lo largo de las playas tropicales y subtropicales. Dentro de estas especies, la más conocida es la Avicennia Marina, esta especie crece en regiones densas, en limos planos a lo largo de costas y estuarios, en pantanos costeros salados y en bancos rivereños a lo largo de regiones bajas. Estos mangles tienen raíces largas con extensiones denominadas pneumatóphoros que favorecen el intercambio de gas y coincidentemente atrapan la sal que se extiende en la línea de costa. Las semillas maduran y germinan en el árbol para luego caer en el limo.

Otra especie que resultaba amenazada es la Halodule Uninervis, esta especie pertenece a lo que se conoce como pasto marino. Consta de hojas de entre 6 a 15 cm de longitud y 0.25 a 3.5 mm de ancho, unidas por la base, en ocasiones encorvadas. Esta especie es típica en las regiones poco profundas.

Para las dos especies anteriores se estableció una base de conocimientos, que consiste en una revisión de información reciente y relevante de los requerimientos físicos del hábitat para cada especie. En esta aplicación se debe poner atención en las curvas de conveniencia, dichas curvas se construyen a partir del estudio del impacto que producen la temperatura del agua, salinidad y

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

profundidad del lecho, conociendo algunos valores, se elabora una gráfica; para los valores intermedios bastará con utilizar interpolación lineal. La gráfica resultante contará con un rango en el que se tendrá un índice constante de conveniencia de 1 (rango en el que la especie no se ve afectada), y antes y después de dicho rango existirán regiones con pendiente constante, la primera positiva y la segunda negativa, hasta llegar a los puntos donde el índice de conveniencia tiene un valor de 0. Otra información relevante en otros estudios, tal como la concentración de cloro y sustancias que inhiben la sedimentación no es necesaria en el campo de acción de estos estudios.

Para la generación de las curvas de conveniencia se requiere información tabular respecto a los parámetros vitales de cada especie, un ejemplo se muestra en el Cuadro 4. 1:

Cuadro 4. 1

Índice de Conveniencia

<i>Especie</i>	<i>Temperatura (° C)</i>	<i>Profundidad (m)</i>		<i>Salinidad (o/oo)</i>		
<i>Avicennia marina</i>	5	0	0	1	0	1
	25	1	0.5	1	30	1
	34	1	1.5	0	85	0
	40	0				
<i>Halodule uninervis</i>	5	0	0	0	10	0
	25	1	0.5	1	25	1
	37	1	2	1	35	1
	40	0	10	0	60	0
<i>Índice de Conveniencia</i>		<i>0-Inconveniente</i>		<i>1-Conveniente</i>		

Para las condiciones físicas dentro de los rangos definidos, se considera válido utilizar interpolación lineal.

Inspección Biológica

Una inspección de campo se deberá llevar a cabo para establecer de manera exhaustiva las bases del entorno biológico existente. Para esta inspección se deberán tomar muestras de los sedimentos para la identificación de las especies locales, así como para determinar los hábitats presentes en la región. Adicionalmente se deberán realizar grabaciones de imágenes en intervalos regulares, del espacio submarino.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

Criterios utilizados para determinar el desempeño de las diversas alternativas de reubicación de la descarga.

De acuerdo a los criterios operacionales para reducir el impacto ambiental al máximo, se consideraron los siguientes valores como referencia:

- *Máximo incremento de temperatura permitido: $\Delta T=1^{\circ} C$*
- *Máximo incremento en la salinidad: $\Delta S=0.5\text{‰}$*

De la base de conocimientos ecológicos se tomaron como referencia los valores obtenidos de la laguna de Ras Hanjurah:

- *Reducción del nivel medio de la laguna para acercarse al nivel medio del mar.*
- *Incremento del rango entre mareas.*
- *La temperatura del agua podrá alcanzar su máximo, pero sólo durante cierto tiempo al subir la marea ($\Delta T=2^{\circ} C$)*
- *El incremento en la salinidad no se considerará crítico.*

Resultados hidrodinámicos de los diversos diseños para la reubicación de la descarga

La situación existente antes del proyecto, así como algunos escenarios diversos, han sido estudiados dentro de las circunstancias más adversas en el verano, i.e. las condiciones más bajas en cuanto a marea y ausencia de viento. Aunado a lo anterior, para una geometría de descarga, se ha estudiado la influencia del viento así como las circunstancias más extremas, para la simplificación de este estudio, se han conformado dos categorías:

1. *La descarga es canalizada a través de la laguna de Ras Hanjurah hacia el mar, investigando esquemas de canales sin revestimiento así como canales revestidos.*
2. *La descarga se vierte directamente en el mar, alejada de la entrada de alimentación de la planta entre 1700 y 2000 m.*

Los resultados de los cálculos de recirculación favorecen a la opción de utilizar un canal revestido a través de la laguna para después verter en el mar, o bien, una descarga directa en el mar lo más lejana posible de la alimentación de la planta, con algunas barreras para evitar la intromisión de la corriente de desperdicio en la alimentación de la planta.

El impacto que puede generar la construcción de barreras en la costa, puede ser simulado por medio de algún modelo matemático de morfología de la costa. Los valores del transporte litoral podrán ser calculados de acuerdo a las estadísticas locales del oleaje. Los disturbios causados por los movimientos de los bancos de arena pueden resultar en una erosión que podría alcanzar los 400 ó 500 m hacia el mar en 25 años.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

Impacto en el estado de calidad ecológica para diversos diseños de la descarga

La conveniencia del hábitat de los mangles se deriva de las reglas de conveniencia del hábitat en general y las condiciones de profundidad, temperatura y salinidad en cada uno de los elementos de la malla. Durante la simulación de las distintas ubicaciones de la descarga, la conveniencia del entorno ecológico es calculada con el mínimo de cada uno de los tres parámetros, en otras palabras las condiciones limitantes definen las conveniencias locales. Como valores de entrada se utilizan las condiciones generadas en la época más desfavorable, que en este caso es el verano. La anterior selección brinda un indicador promedio de las condiciones temporales más críticas. Deberá tomarse en cuenta que la profundidad en la laguna estará regida por el nivel de la marea en combinación con la cantidad de agua descargada por la planta desaladora. El rango de mareas puede ser reducido al colocar una barra de arena enfrente de la laguna. La existencia de dicha barra limitará las variaciones de la superficie de la laguna debidas a los cambios en el nivel del mar producidos por la marea, lo que a su vez podrá afectar el desarrollo del área de mangles.

La situación original, antes de este estudio es sumamente riesgosa en lo que a la conservación de los mangles que habitan la laguna se refiere. Debido a la ubicación de la descarga en la laguna, las temperaturas exceden lo 40° C por periodos prolongados durante el verano, teniendo consecuencias letales en el ecosistema. Más aún, el nivel de agua en la laguna se ha excedido entre 40 y 50 cm respecto a la situación original; lo que genera una mayor profundidad, afectando negativamente a los mangles.

Los estudios han revelado que las condiciones actuales en la laguna, son sumamente inconvenientes para los mangles. En la mayor parte de la laguna se registra un índice de conveniencia de entre 0.1 y 0.2, indicando que los mangles presentes en la laguna sufren daños significativos debido a la descarga del concentrado. Si la descarga es reubicada a una región externa a la laguna, la situación mejora notablemente.

Además del mangle, otra especie es muy susceptible a las variaciones de temperatura y salinidad. El pasto marino se ve limitado en su proliferación por la salinidad, la temperatura del agua y la profundidad. En las condiciones actuales, donde la descarga se hace directamente a la laguna, dicha especie se encuentra esparcida en un área reducida. Existe sin embargo, un potencial desarrollo de esta especie en áreas mayores. El desarrollo potencial del pasto marino en la vecindad de la descarga, está limitado por temperaturas elevadas; esto afecta a una región significativa en las proximidades de la costa. Adicionalmente, la profundidad es un factor limitante, se ha observado una casi nula presencia en el sur de la laguna, donde existe un área muy sensible a las mareas y en la región noroeste donde la profundidad del agua excede los límites de proliferación. Además de estos tres parámetros, existen otras condiciones ambientales que pueden ser limitantes, tales como una elevada concentración de material de sedimentación, turbiedad, velocidades en las corrientes, así como los nutrientes. Consecuentemente, una mejora sustancial en la salinidad, temperatura y profundidad, no garantiza el crecimiento de esta especie debido a la influencia de otros factores limitantes.

Para poder comparar los distintos escenarios entre sí, será necesario calcular el porcentaje de área de hábitat óptimo. La conveniencia de hábitat de cada celda que conforma la malla es

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

multiplicada por el valor de su área, esto nos arrojará un valor que ponderará tanto el índice de conveniencia como el área, posteriormente se suman los valores representativos ponderados de cada celda, esta suma se dividirá entre la superficie total y se tendrá el valor del índice de conveniencia de toda la superficie, que en términos porcentuales representará la cantidad de superficie donde se podrán desarrollar dichas especies en condiciones óptimas. Se consideraron diversos escenarios, el original, donde no se ha considerado la reubicación es el T01. Se considera también la opción de utilizar un canal protegido a través de la laguna hacia el mar (T51), o bien una descarga al mar lo más lejos físicamente posible (T81). Se considera otra opción utilizando una escollera que proteja a la laguna y ubicar a la descarga más allá de dicha escollera (F01). Por último se considera una ubicación de la descarga en la línea de costa, en combinación con una cercanía considerable a la toma de agua de la planta, lo que por otro lado permitirá un ahorro en los combustibles utilizados en el calentador de salmuera (F07). La simulación de los escenarios descritos anteriormente arrojó los resultados descritos en el Cuadro 4. 2:

Cuadro 4. 2
Porcentaje de área óptima del hábitat

<i>Escenario</i>	<i>Mangles (%)</i>	<i>Pasto marino (%)</i>
<i>T01 (situación original)</i>	<i>4.7</i>	<i>54</i>
<i>T51</i>	<i>51</i>	<i>52</i>
<i>T81</i>	<i>53</i>	<i>57</i>
<i>F01</i>	<i>46</i>	<i>53</i>
<i>F07 (diseño final)</i>	<i>46</i>	<i>52</i>

El porcentaje de área óptima para hábitat en el caso de los mangles, muestra una enorme mejora si es comparado con la situación original donde menos del 5% del área ocupada por mangles existentes se encuentra en condiciones óptimas. En los escenarios subsecuentes, al reubicar la descarga del concentrado, se logra que la superficie con condiciones óptimas se encuentre cerca de un 50%. El porcentaje de superficie óptima para el pasto marino no se ve muy afectado por la ubicación de la descarga. Existen diferencias en cuanto a la distribución espacial del pasto marino para cada escenario, aunque el valor final permanece prácticamente sin variaciones.

Conclusiones y recomendaciones.

El estudio brinda información cuantitativa que da soporte a la decisión para la reubicación de la descarga, basándose en tres aspectos principales: recirculación de la salinidad y calor existentes al colocarse la descarga cerca del canal de entrada de la planta, impacto en la morfología costera, así como el impacto en el ecosistema marino de la laguna de Ras Hanjurah y en la zona marina exterior. Los índices de conveniencia en el hábitat son derivados al incorporar los

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

resultados numéricos de los modelos hidrodinámico y de dispersión que brindan las curvas de conveniencia para los parámetros físicos más relevantes, como son las fluctuaciones en la profundidad, temperatura y salinidad. Para estos análisis ecológicos, fueron consideradas dos especies clave, que son el mangle (*avicennia marina*) y el pasto marino (*halodule uninervis*).

El Departamento de Agua y Electricidad de Abu Dhabi ha seleccionado la ubicación de la descarga en la costa, a 2000 metros de distancia de la alimentación de la planta, siendo protegida por barreras marinas, cuya altura apenas rebasa el nivel marino. El cierre complementario del tubo de alimentación, ubicado al sur, se llevará a cabo en una etapa posterior, cuando la descarga se incremente a su nivel de diseño de 100 m^3 por segundo al terminarse la etapa de ampliación de la planta. Durante todo el tiempo comprendido entre ambos eventos, los cambios en la temperatura del agua marina serán monitoreados y examinados cuidadosamente.

4.2 CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES PRODUCTO DE LA COMBUSTIÓN

La necesidad del vital líquido día con día, va generando presiones en diversas partes del planeta; consecuentemente, todos los sistemas artificiales que puedan incrementar la disponibilidad del agua, así como su reutilización van encaminados a ser mejorados y optimizados. Por otro lado, uno de los mayores problemas consiste en el sobrecalentamiento y contaminación de la atmósfera, que es causado por diversos factores, entre los que destaca la emisión de gases producto de la combustión en las plantas termoeléctricas. Debido a lo anterior, es imperativo que cualquier proceso artificial sea mejorado para reducir el calor producido así como la demanda de energía.

En cuanto al consumo de energía calorífica por parte de las plantas destiladoras, será fundamental implantar mecanismos que aprovechen al máximo el calor producido, esto se puede hacer con la ayuda de barreras físicas que impidan la disipación de calor por conducción, convección y radiación. También deberá ponerse especial atención en la combustión, pues una combustión incompleta, generará mayores cantidades de contaminantes que serán arrojados a la atmósfera.

En lo referente al consumo de energía eléctrica, es sabido que en México, más del 60% de la energía eléctrica, es producida en plantas termoeléctricas; este tipo de plantas consume enormes cantidades de combustible fósil para la generación de electricidad. De lo anterior se desprende que un ahorro en el consumo de energía eléctrica por parte de las plantas desalinizadoras, se traducirá en una menor emisión de contaminantes a la atmósfera por parte de las plantas termoeléctricas. Es por ello que se deberá de poner especial énfasis a los dispositivos que puedan hacer más eficientes los procesos de desalinización.

En el campo de la desalinización del agua marina, existe una limitante de origen físico, que establece que la energía requerida, dependerá de dos parámetros; salinidad y temperatura. La energía requerida para separar las sales de la solución se incrementará con el aumento en la temperatura y de la salinidad. Por ejemplo, en el Océano Atlántico, la energía requerida para

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

purificar un metro cúbico de agua será sustancialmente menor a la requerida en el Golfo Pérsico.

En la actualidad los principales procesos comerciales de desalinización son los térmicos (MSF, MED, VC) y los mecánicos (ósmosis inversa). Los primeros aún conservan una ligera superioridad sobre los segundos, sin embargo, se prevé que dicha tendencia se revertirá durante los próximos años. Actualmente existe una competencia muy fuerte entre todas las tecnologías, tanto en términos de inversión, costo y desempeño.

Los procesos térmicos MSF y MED, utilizan energía en forma de calor y electricidad, mientras que el de compresión de vapor utiliza exclusivamente electricidad. Para brindar una idea del nivel de energía específica utilizada en cada uno de estos procesos, será necesario establecer la relación de desempeño (PR del inglés Performance Ratio); a continuación se muestra información típica para cada procedimiento:

- *Plantas de destilación en etapas múltiples (MSF) con PR de 9: energía eléctrica 3,4 Kw/m³, energía de calor 8 kW/ m³.*

Total 11,4 kW/ m³.

- *Plantas destiladoras por multiefectos (MED) con PR de 12: energía eléctrica 2,9 kW/ m³, energía de calor 4,5 kW/ m³.*

Total 7,4 Kw/m³.

- *Plantas destiladoras por multiefectos combinadas con turbocompresión de vapor (MED+TVC) con PR de 14: energía eléctrica 2,5 Kw/m³, energía de calor 6,5-kW/ m³.*

Total 9-kW/ m³.

- *Plantas de compresión de vapor (VC): energía eléctrica 14-kW/ m³.*

Total 14-kW/ m³.

La Figura 4. 1 muestra la variación en la relación de desempeño según la energía consumida. Como se puede observar, todos los procesos requieren un suministro de energía de entre tres y cuatro veces el valor ideal, lo que significa que aún hay mucho por hacer en lo que se refiere a la investigación. De lo anterior se deduce que en los próximos años, los costos de producción de agua dulce a partir de agua salada se abatirán de manera considerable.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

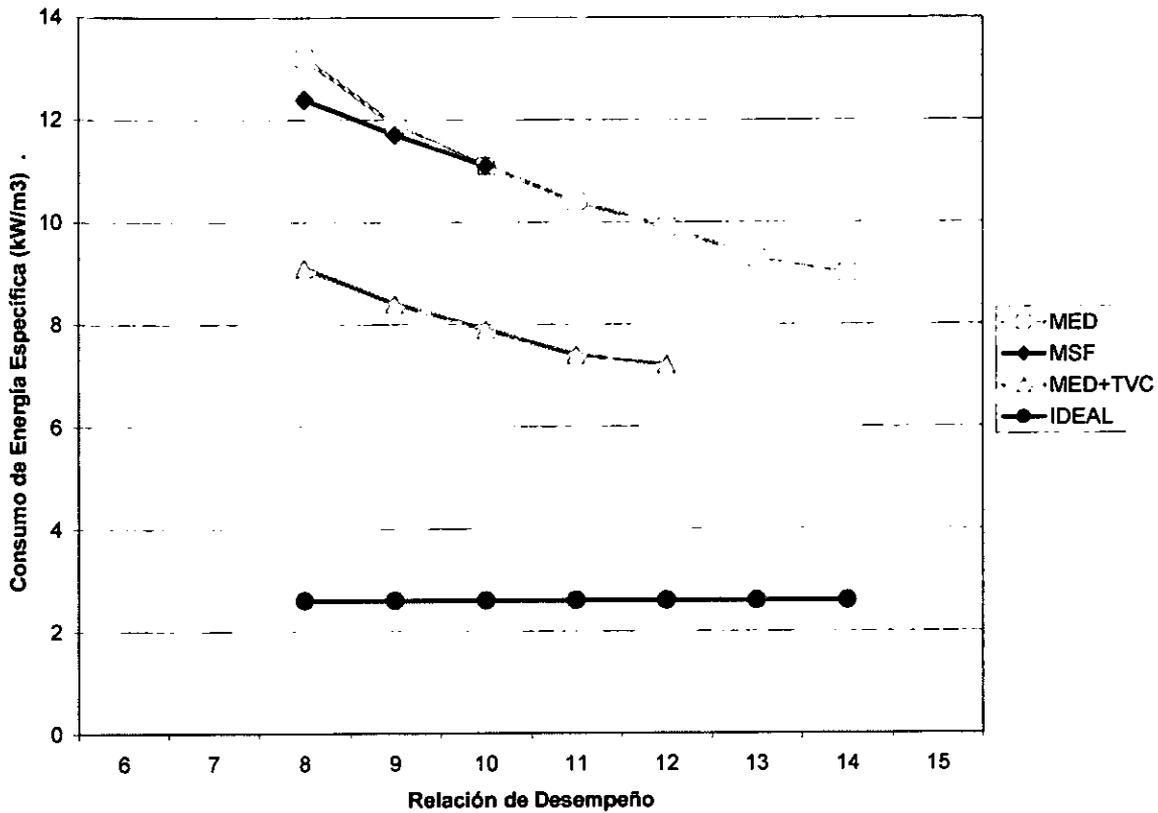


Figura 4.1
Consumo de Energía en función de la Relación de Desempeño

Conceptos como “planta de propósito doble” o “plantas híbridas” descritos brevemente en el capítulo II, serán de gran importancia para aumentar la eficiencia en los procesos y consecuentemente reducir la cantidad de energía requerida reduciendo así las emisiones contaminantes.

La mayor parte de desalinizadoras a gran escala funcionan con métodos de destilación, que requerirán principalmente presión de vapor saturado baja como fuente de calor, y algo de energía eléctrica para los equipos auxiliares. Desde un punto de vista termodinámico, las plantas destiladoras de agua salada deberán de funcionar en combinación con plantas generadoras de electricidad en un complejo denominado “plantas de doble propósito”, en donde el vapor con alta presión se utilizará para generar electricidad y el vapor de baja presión sobrante, servirá como fuente de calor para la destilación.

El planteamiento anterior presentado de esta manera, puede resultar muy simple, sin embargo, será necesario considerar que en condiciones reales, la demanda de energía eléctrica no se encuentra ligada a la demanda de agua para uso municipal; por ejemplo, en regiones calurosas, durante el verano, el consumo de energía eléctrica aumenta sustancialmente en más de un 30%, mientras que el consumo de agua permanece prácticamente constante a lo largo del año; como

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

una consecuencia directa de esta característica, será necesario incluir también el concepto de "plantas híbridas". Estas plantas van acopladas a las plantas generadoras y tendrán como característica principal, el contar con una síntesis de las dos vertientes tecnológicas, la desalinización por métodos térmicos y la desalinización por métodos mecánicos.

El concepto de plantas híbridas se ajusta a la característica de variabilidad en la demanda de energía eléctrica, por ejemplo, al existir un pico de demanda en el suministro de energía eléctrica, se generará mucho vapor de baja presión que podrá ser utilizado en un método de desalación térmico; mientras que al bajar la demanda en el consumo eléctrico, la energía eléctrica excedente puede ser utilizada para poner en operación una planta que opere con membranas (mecánica).

Los conceptos de plantas duales e híbridas, sientan las bases para un consumo más racional de los energéticos que permitirá el mejor aprovechamiento de nuestros recursos no renovables, así como un menor deterioro del ambiente.

Los procesos de ósmosis inversa, dentro de su funcionamiento interno, pueden llegar a niveles de eficiencia muy elevados, utilizando dispositivos de recuperación de energía.

En estos procesos, la única energía entrante es la eléctrica, la optimización en el consumo de esta energía nos lleva a realizar la siguiente muestra del consumo de energía de acuerdo a la existencia de dispositivos:

- *En procesos de Ósmosis Inversa que no cuentan con dispositivos de recuperación de energía, para una salinidad de 45 gr/l, se consumen 9 kW/m³.*
- *En procesos de Ósmosis Inversa que cuentan con dispositivos de recuperación de energía, para una salinidad de 45 gr/l, se consumen 5.5 kW/m³.*

La Figura 4. 2 presenta el consumo de energía en función de la salinidad.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

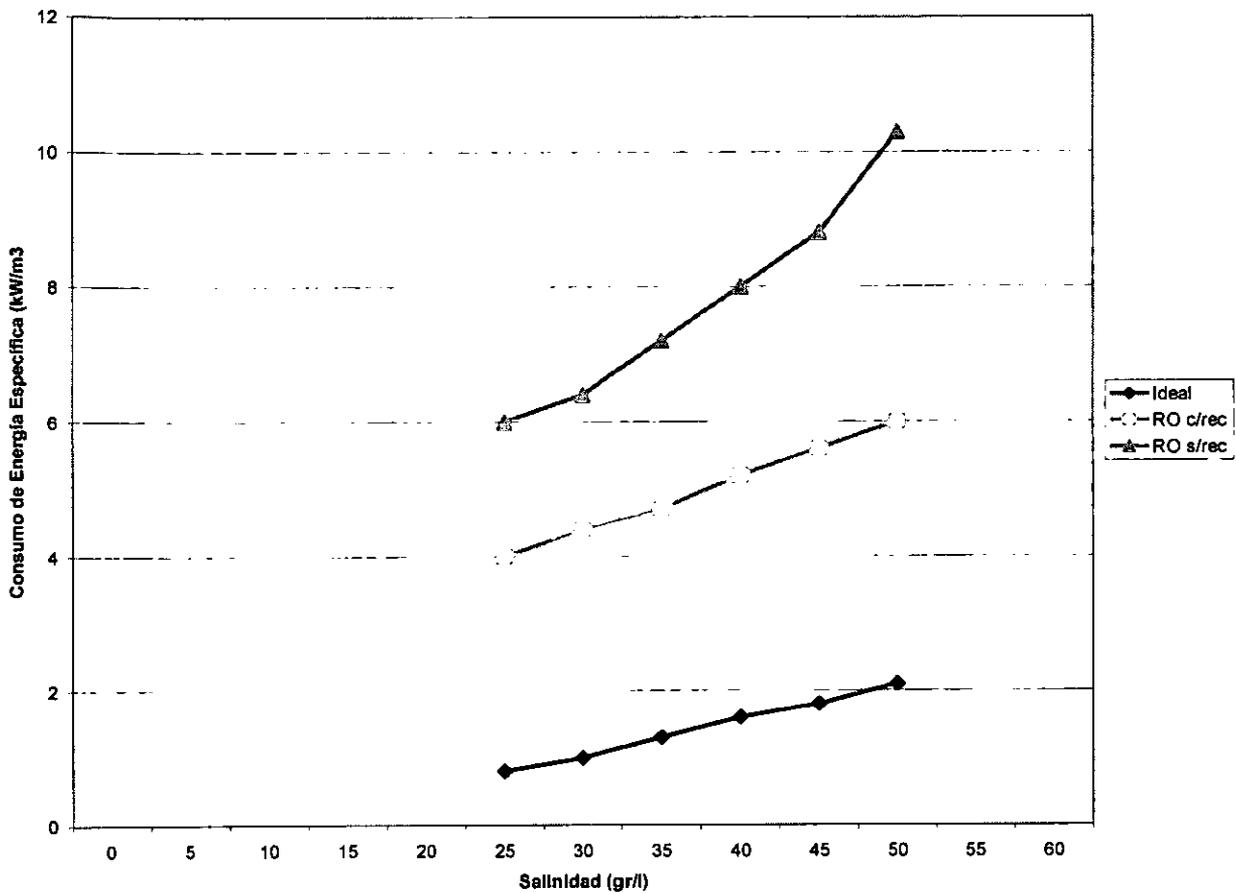


Figura 4. 2
Consumo de energía de acuerdo a la salinidad

Avances y mejoras en las turbinas de recuperación de energía para las plantas de ósmosis inversa, se centran en el incremento de la eficiencia general del sistema, facilidad de operación y mantenimiento. Nuevos desarrollos en turbinas Pelton logran eficiencias en los sistemas de hasta un 90%. Desarrollos recientes permiten controlar flujo y la presión con orificios adicionales, resultando en una significativa reducción de pérdidas en las válvulas. Diversas opciones prácticas se encuentran comercialmente disponibles como son las turbinas Francis, turbinas Pelton y turbocargadores.

La energía requerida para producir un metro cúbico de agua en los procesos de ósmosis inversa puede variar ampliamente. El costo final dependerá del costo local de la energía, el tipo de planta de ósmosis inversa y los componentes utilizados en la planta.

En el mercado actual se cuenta con tres sistemas: la turbina Pelton, la bomba centrífuga reversible o turbina Francis y los turbocargadores. Existen otros sistemas en investigación que aún no han alcanzado la madurez suficiente para salir al mercado.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

La turbina Pelton se utiliza para convertir la energía presente en la presión del concentrado en energía cinética. El fluido a alta presión pasará a través de uno o dos orificios ajustables y se dirigirá a la rueda. La rueda al girar recobrará la energía de la turbina y descargará el fluido a la presión atmosférica. La energía rotatoria podrá entonces ser utilizada para abastecer al motor de la bomba principal.

La turbina Pelton tiene la ventaja de poderse entubar fácilmente al sistema, la curva de su comportamiento es plana y la eficiencia permanece en su rango total de operación. Los cambios en el flujo y en la presión no afectan la operación de la turbina. El orificio de entrada actúa como una válvula de control, por lo que no se requiere de una válvula de control adicional. La turbina puede funcionar seca durante cortos períodos de tiempo sin producir efectos adversos. La energía de recuperación comienza en cerca del 40% de la presión del sistema.

La bomba reversible o turbina Francis como se conoce comúnmente, no tiene un tamaño comercial para esta función, por lo que se suelen utilizar bombas centrífugas para recuperar energía. Tanto bombas horizontales como bombas con sección de anillo pueden ser utilizadas para este propósito. Los tamaños de la bomba se deberán ajustar a las características específicas de la planta, también se requerirá una válvula en la descarga. En el arranque la turbina deberá de encontrarse ahogada y deberá tener el efecto de freno. Los cambios de presión o de flujo, deberán ser regulados resultando en pérdidas de eficiencia. Es importante hacer notar que estas turbinas no empezarán a generar energía sino hasta que se haya alcanzado un 40% de las condiciones de diseño. Un motor de tamaño adecuado deberá ser instalado.

El sistema de transferencia de energía hidrodinámica (turbocargador) desarrollado a principios del siglo XX, ha llegado a utilizarse en años recientes. Este proceso transmite el torque de un impulsor de turbina a otro, por medio de un dispositivo que transfiere masa, en lugar de utilizar el flujo de presión como en otros dispositivos. El turbocargador consiste en un dispositivo de recuperación de energía compuesto por impulsores de turbina y de bomba directamente conectados, produciendo transferencia hidráulica. En teoría, no tiene pérdida, y toda la energía del fluido de la salmuera es directamente transmitida a flujo de alimentación que proviene de la bomba principal. Sin embargo, el proceso tiene pérdidas significativas debidas a la baja eficiencia y es muy susceptible a las variaciones en el proceso. En principio es lo mismo que una bomba centrífuga acoplada a una turbina Francis. Contrariamente a los otros sistemas, este dispositivo opera a velocidades de alrededor 20,000 RPM.

El turbocargador requiere una válvula reguladora para la presión de la salmuera, lo que resulta en la reducción de la energía recuperada. Los equipos suelen emitir niveles de ruido elevados. El turbocargador es muy sensibles a la consistencia del volumen y la presión de la salmuera para mantener eficiencias óptimas y tiene que ser diseñado para una carga específica. Las variaciones en el flujo de diseño o presión, como suelen ocurrir en los sistemas de ósmosis inversa debido a la edad de la membrana, temperatura del agua y cualquier otro cambio en el proceso, tiene un efecto significativo en el desempeño del turbocargador, resultando en una caída de la eficiencia.

El Cuadro 4. 3 presenta una comparación de los tres dispositivos de recuperación de energía:

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

Cuadro 4. 3

Comparación de dispositivos de recuperación de energía

	<i>Turbina Pelton</i>	<i>Bomba Reversible</i>	<i>Turbocargador</i>
<i>Inversión Inicial</i>	<i>Media, entre un 20 y 25% del valor de la bomba</i>	<i>Elevada, alrededor de un 60 ó 70% del valor de la bomba</i>	<i>Baja, alrededor de un 15 a 25% del valor de la bomba</i>
<i>Eficiencia</i>	<i>Elevada, dependiente del flujo y presión, 80-86 %</i>	<i>Media, dependiente del flujo y presión, 75-82%</i>	<i>Baja, dependiente del flujo y presión, máxima del 70%</i>
<i>KW recuperados</i>	<i>20-1200</i>	<i>50-1500</i>	<i>Usada principalmente en bombas pequeñas</i>
<i>Vida útil</i>	<i>Elevada, 15 años o más en la mayoría de sus componentes</i>	<i>Elevada, 10 años o más en la mayoría de sus componentes</i>	<i>Desconocida, puede ser baja por su alta velocidad</i>
<i>Experiencia Operacional</i>	<i>Libre de fallas con requerimientos bajos de mantenimiento</i>	<i>Libre de fallas con mantenimiento moderado</i>	<i>Poco conocida, reparaciones en campo difíciles</i>
<i>Características en la Instalación</i>	<i>Requiere flujo externo libre. Se conecta a la bomba o al eje del motor</i>	<i>Conectado a la bomba o al eje del motor</i>	<i>Fácil de instalar, requiere regulador de presión</i>

La eficiencia general de la turbina tendrá un impacto significativo en el consumo de energía de la planta. Esto es particularmente importante en el caso de turbinas de gran tamaño. Las turbinas Pelton tienen un rango de eficiencia de entre el 80 y el 87%, dependiendo del tamaño de la turbina y de las características de la salmuera. En el caso de la planta de Marbella, cuya producción es de 60,000 metros cúbicos diarios, algunos estudios revelaron que existía una eficiencia del 87.18%. En plantas hidroeléctricas sin embargo, eficiencias de más del 90% se pueden lograr. Los diseños hidráulicos de las paletas de la turbina pueden ser perfeccionados puliendo y afilando a mano.

En junio de 1996, se inició un programa de investigación y mejoras en el diseño hidráulico en la universidad de Lausana. Las primeras investigaciones muestran ciertas áreas donde se pueden realizar mejoras sustanciales, por ejemplo, el ángulo de impacto de la turbina así como el diseño de las paletas, son áreas para un futuro desarrollo. A fines de 1998 se lograron las primeras turbinas Pelton con eficiencias mayores al 90%. Estos trabajos se han realizado en turbinas de gran escala cuyos flujos superan los 150 m³/h.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO IV. IMPACTO AMBIENTAL

- *Uso de fuentes de energía renovables (solar, eólica, geotérmica)*
- *Destilación Solar*
- *Uso de fuentes de calor generado y no utilizado por otras industrias (termoeléctricas).*

En el caso de plantas de gran escala, mientras los científicos no encuentren otro método de desalinización, pocas mejoras se podrán hacer y estarán concentradas principalmente en la optimización de los equipos e integración entre procesos, tales como las plantas híbridas.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

5 CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Las instalaciones desalinizadoras existen en alrededor de 120 países en el mundo, la determinación exacta de los costos de desalinización no es fácil de obtener. Lo que sí se puede decir con certeza, es que los costos para inversión y operación han tenido una clara tendencia a disminuir en los últimos años, aunque el incremento en los costos de los energéticos de los años 70 afectó la producción. De cualquier forma, los costos de desalinización han ido disminuyendo, mientras que los costos de obtención y tratamiento de agua a partir de fuentes convencionales han tendido a incrementarse debido al alto nivel de tratamiento que está siendo requerido en diversas naciones para alcanzar los estándares de calidad del agua. Esta alza en el costo de agua convencionalmente tratada, también se debe al incremento en la demanda, encabezado por la necesidad de fuentes de abastecimiento cada vez más costosas, dado que las fuentes actuales ya han sido sobreexplotadas.

En un futuro cercano los costos de producción de agua marina, se acercarán a los costos de producción de agua a partir de fuentes convencionales, para ese momento, existirá un plazo que se podrá aprovechar para sentar las directrices que regirán la explotación de las futuras fuentes de agua, tal y como se muestra en la Figura 5. 1.

Costos Relativos

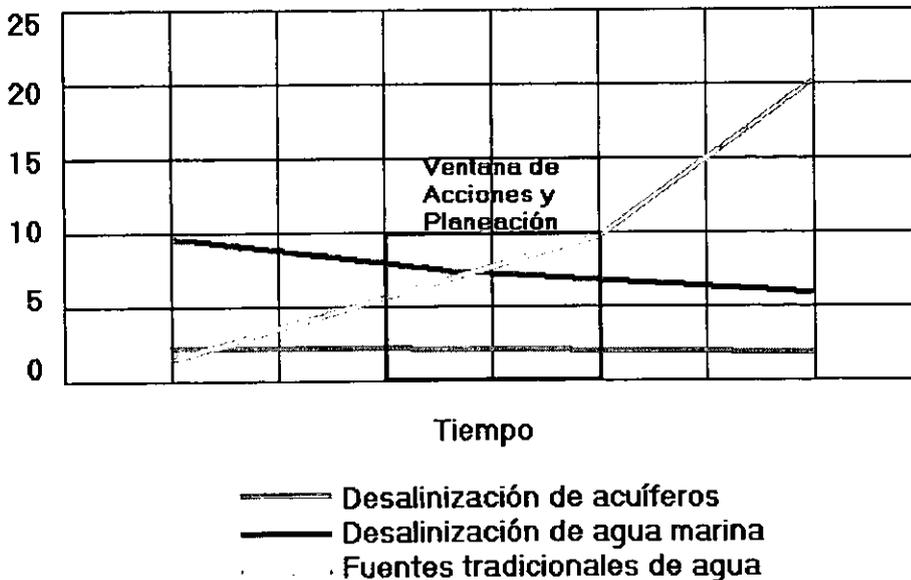


Figura 5. 1
Costos relativos de producción de agua

Según el inventario de Wagnick Consulting, en diciembre de 1995 existían alrededor de 11,000 plantas desaladoras en todo el orbe, con una capacidad total instalada o contratada de 20.3

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

millones de metros cúbicos diarios. Esencialmente, la mitad de dicha capacidad reside en el Medio Oriente. Los procesos de destilación por evaporación en etapas múltiples (MSF), utilizando agua marina como fuente, ocupan alrededor de la mitad de toda la capacidad instalada de desalación y el 80% de esas unidades se encuentran ubicadas también en el Medio Oriente. Sin embargo, los procesos de ósmosis inversa (RO) para tratar agua marina se abren camino dentro de la posición dominante de las plantas MSF. De 1985 a 1995 la relación de capacidad de producción de plantas nuevas RO respecto a las MSF fue de 3.2 a 1.

Análisis recientes revelan que la participación en los mercados desaladores de agua marina por parte de las plantas de ósmosis inversa resulta más económica en cuanto a costos de capital y de operación.

La dinámica en la industria de generación eléctrica ha sido marcada por el crecimiento en la demanda, la privatización y mejora económica. Los cambios más significativos han sido en el mejoramiento de la eficiencia de la configuración en los ciclos combinados para tecnologías de turbinas de gas (GTCC Gas Turbine Cycle Configuration). Con el incremento en la disponibilidad de gas natural, la demanda de electricidad está siendo satisfecha y resulta efectiva en costo. El incremento en el rendimiento ha sido logrado a través de la mejora en la tecnología de materiales y configuraciones del ciclo. El vínculo estrecho entre esta mejora y las modificaciones en los procesos de ósmosis inversa, permiten ofrecer precios de agua y energía eléctrica significativamente menores a los de las plantas duales utilizadas anteriormente.

En términos generales diversos factores afectan los costos de inversión y operación para la desalinización, como son: capacidad y tipo de planta, ubicación de la planta, fuente de alimentación, mano de obra, energía, financiamiento, manejo de residuos y confiabilidad. En general, el costo de desalinizar agua marina es entre 3 y 5 veces mayor que desalinizar agua subterránea hablando de plantas con capacidades de producción similares. A lo largo de los años 80, un número importante de comunidades en los Estados Unidos adoptó la técnica de desalinizar agua subterránea, en lugar de bombear agua de otros acuíferos a lo largo de extensas tuberías, esto debido a la reducción en los costos, utilizando la primera alternativa.

En 1990, los costos totales de producción, incluyendo recuperación del capital, para sistemas desalinizadores de agua subterránea con capacidades de entre 4000 y 40,000 metros cúbicos por día en los Estados Unidos, variaba de 25 a 60 centavos de dólar. Los costos probables para desalinización de agua marina en plantas con capacidades de entre 4000 y 20,000 metros cúbicos diarios se estima entre 1 y 4 dólares por metro cúbico. Estos valores estimados dan una cierta idea del ámbito de costos involucrado, sin embargo, las condiciones específicas de cada país, harán variar dichos costos. En diversas áreas con escasez de agua, el costo de fuentes alternativas de agua es sumamente alto y frecuentemente más elevado que los costos de desalinización.

El costo de inversión y el costo del producto final juegan un papel preponderante en cualquier estudio de factibilidad para la realización de plantas desaladoras. Al iniciarse los primeros proyectos de desalinizadoras no existía una metodología única y funcional para el cálculo de los costos, por lo que en un principio se debieron definir los procedimientos. Un punto de partida para dicho cálculo fue tomado de la literatura existente relacionada a otro tipo de proyectos.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Conforme los procedimientos se fueron desarrollando, aumentó la experiencia en el cálculo de los costos de construcción y operación.

5.1 COSTO DE CONSTRUCCIÓN

Los costos de inversión serán diferentes para las plantas destiladoras que para las plantas que funcionan con membranas, en estas últimas los costos de inversión serán menores que los erogados en las plantas destiladoras. Adicionalmente, los costos por unidad de agua producida, variarán según el tamaño de la planta, por ejemplo, las plantas de mayores capacidades pueden generar costos por unidad menores que los resultantes en las plantas de menor tamaño tal y como se muestra en la Figura 5. 2 Costos de Inversión

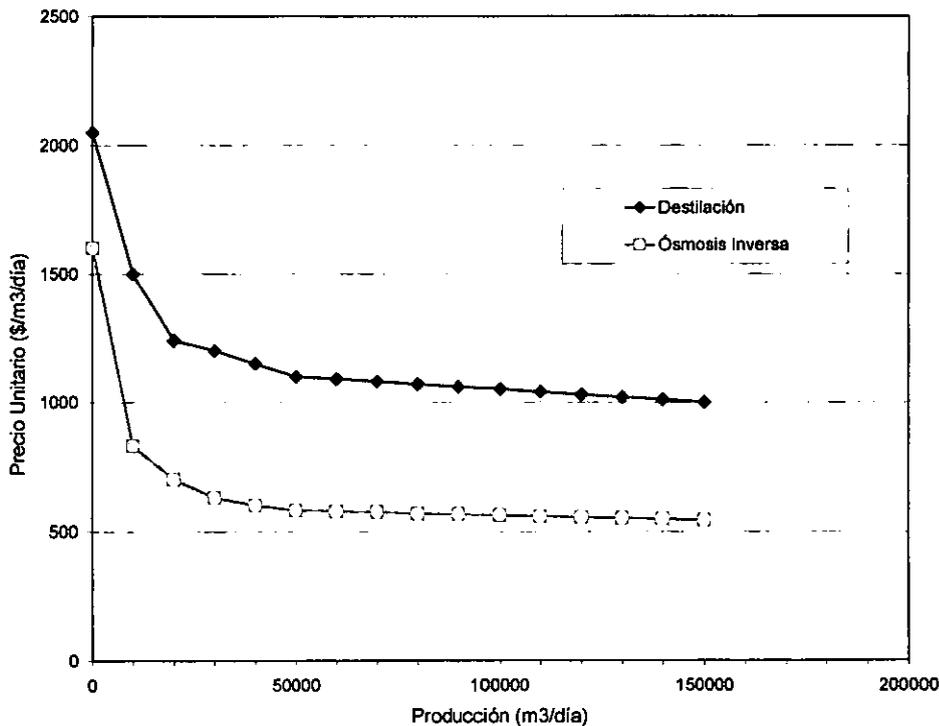


Figura 5. 2 Costos de Inversión

Con el objeto de lograr una aproximación efectiva a los costos reales, será necesario incluir una serie de parámetros económicos básicos, tales como la tasa de interés en el pago de la inversión, el período de amortización y el precio de la energía (combustible y electricidad), un ejemplo razonable de estos parámetros es:

- | | | |
|-----------------|---------|----------------------------------|
| 1. Amortización | Tasa | 7% Anual |
| | Término | 15 años (vida útil de la planta) |

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

2. *Energía* *Combustible* 151.7 dólares/ton

Electricidad

- *Comprada del exterior* 0.057 dólares/kWh
- *Generada en planta dual* 0.0552 dólares/kWh

Los criterios que determinarán la elección de la tecnología a utilizarse, dependerán de diversos factores, por ejemplo, si cerca de la población o núcleo al que se le dotará agua existe una planta termoeléctrica cuyo ciclo de vida útil está por concluir, se puede optar por rehabilitar la termoeléctrica y acoplar una planta destiladora. El costo de la reparación de una planta termoeléctrica se estima en un 33% del costo de la construcción de una planta nueva de la misma capacidad. Los porcentajes de los costos de rehabilitación se muestran en el Cuadro 5. 1.

Cuadro 5. 1
Porcentaje de los Costos de Rehabilitación

<i>Componente</i>	<i>Porcentaje del costo total en una planta nueva</i>	<i>Porcentaje a ser reparado para rehabilitación</i>	<i>Porcentaje del costo sobre el costo total de una planta nueva</i>
<i>Obra civil</i>	8.0	20.0	1.6
<i>Electricidad</i>	10.0	5.0	0.5
<i>Instrumentación</i>	5.0	90.0	4.5
<i>Tuberías y válvulas</i>	8.0	50.0	4.0
<i>Calentador</i>	22.0	40.0	8.8
<i>Turbina</i>	14.0	20.0	2.8
<i>Alternador</i>	11.0	5.0	0.55
<i>Equipo Adicional</i>	10.0	30.0	3.0
<i>Erección</i>	12.0	Nuevo	7.25
TOTAL	100.0		33.0

Como se puede observar en el Cuadro 5. 1, se incluye prácticamente la reparación total de la instrumentación de la planta generadora de electricidad, por lo que se contará con modernos dispositivos de control que ayudarán a la detección y reparación de fallas en las tuberías y válvulas. También se considera la realización de reparaciones mayores en el calentador con el

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

objetivo de mejorar el rendimiento total del ciclo termodinámico para incrementar la eficiencia en la medida de lo posible.

La información anterior arroja como resultado, la conveniencia de reparar una planta termoeléctrica e instalar una nueva planta destiladora acoplada a dicha termoeléctrica, que reemplazar esta última con una nueva planta de ósmosis inversa.

Los procedimientos para el cálculo del costo de construcción de una desalinizadora son muy variados. La metodología empleada es similar a la utilizada para cualquier obra civil, sin embargo, se pueden realizar diversas simplificaciones manejando algunos conceptos como una parte proporcional de otros conceptos de mayor impacto en el presupuesto que deberán ser calculados con la mayor precisión posible.

A manera ilustrativa, para una mejor comprensión del cálculo de los costos, se presenta el procedimiento de cálculo tipificado de una planta MSF con una producción de 100,000 m³/día, con un diseño innovador desarrollado por Wangnick Consulting GmbH de Alemania. Se incluyen algunos de los aspectos más relevantes para la determinación de los costos totales de inversión.

El costo de inversión total se obtiene de agregar a los precios de compra de todos los componentes que conforman la planta, un factor adicional que involucrará los demás costos. Este factor es utilizado para contabilizar los costos internos que pueden ser considerados como una suma global de los proyectos individuales, e.g. costos de investigación y desarrollo.

Para determinar dichos costos de inversión, se hace una división de los diversos elementos que integran la planta. Para ello, regularmente el proyecto se subdivide como sigue:

- | | |
|--|---|
| <i>0. Planta en general</i> | <i>4. Postratamiento del destilado</i> |
| <i>1. Abastecimiento de agua salada</i> | <i>5. Almacenamiento del agua potable y transferencia</i> |
| <i>2. Pretratamiento del agua salada</i> | <i>6. Manejo de la salmuera</i> |
| <i>3. Sistema desalador</i> | <i>7. Equipamiento adicional</i> |

Para fines ilustrativos, solamente se hará el cálculo del apartado 3 (sistema desalador), y de éste, sólo se hará mención al evaporador, el calentador de salmuera y la bomba de abastecimiento de agua salada, por tratarse de los elementos de más trascendencia en el sistema desalador.

Una vez que los costos de estos tres elementos del apartado 3 han sido determinados, deberá de hacerse un desglose donde figuren los costos indirectos que serán calculados como un porcentaje tal y como se muestran en el Cuadro 5. 2

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 2
Costos indirectos para el sistema desalador

<i>Partida</i>	<i>Costo Indirecto (%)</i>
<i>Personal</i>	3
<i>Materiales</i>	3
<i>Garantía</i>	2
<i>Investigación y Desarrollo</i>	3
<i>Riesgo Técnico</i>	2
<i>Departamento de Ventas</i>	7
<i>Administración</i>	8
<i>Flete</i>	5
<i>Seguros</i>	1
<i>Viáticos</i>	1
<i>Agentes</i>	5
<i>Utilidad</i>	5

Para cada uno de los elementos, será necesario calcular los costos indirectos. Los costos de inversión obtenidos de cada uno de los componentes son sumados y se obtiene así el capital total invertido en la planta.

Estructura de cálculo para los costos de inversión

En este proceso, se asume que el contratista debe de ofrecer un proyecto llave en mano donde los elementos pueden ser adquiridos de un tercero o bien manufacturados directamente por el contratista. Para los elementos adquiridos de un tercero, el contratista traslada los precios de dicho componentes (equipo) incluyendo su instalación y para los elementos fabricados directamente por él se realiza el cálculo de acuerdo a la Figura 5. 3. Los componentes calculados en detalle (e.g. el evaporador) son tratados como equipo adquirido.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Las bombas 3.740.000 a su vez se subdividen en:

3.740.030 Bomba de abastecimiento de agua salada

3.740.040 Bomba de salmuera

3.740.050 Bomba del destilado

3.740.060 Bomba del calentador del concentrado

El grado de subdivisiones posteriores dependerá del detalle deseado en el cálculo de los costos, la información disponible, así como la influencia en el costo total. Las unidades que representen una parte considerable de los costos de inversión, deberán tratarse con el mayor detalle posible (para lograr una mejor aproximación del costo), en tanto que las unidades cuyo costo sea relativamente bajo podrán ser tratadas de forma menos detallada. Los componentes calculados en detalle deberán desglosarse en todos sus ensambles y componentes. Este tratamiento preciso deberá ser observado en el evaporador, dado que representa los mayores costos de inversión. Por la razón anterior, se asume que el proveedor al que se le ha adjudicado el proyecto llave en mano, deberá por lo menos él mismo manufacturar el evaporador y el calentador de salmuera o bien manufacturarlo un tercero bajo su control directo. Adicionalmente, la bomba de abastecimiento del agua salada (3.740.030) se calculará con mayor detalle debido a que estos costos pueden variar considerablemente si los parámetros para el cálculo de la planta son modificados (por ejemplo, si la velocidad del líquido es alterada, la carga en las bombas puede cambiar sustancialmente); los componentes restantes pueden ser tomados en cuenta con un factor de incremento en sus costos directos.

Para evitar una duplicidad, los precios de los componentes de la planta calculados en detalle (antes de cambios posteriores) serán exclusivamente determinados por los costos de material, desperdicio de material (3%), o costos de producción más el excedente. Todos los cargos adicionales serán entonces agregados para el resto del equipo. El cálculo del costo detallado de los componentes se explica en la siguiente sección:

Evaporador

Los costos materiales del evaporador se resumen en partes individuales que se listan a continuación:

3.710.011	Cubierta- Placa superior
3.710.012	Cubierta- Paredes laterales
3.710.013	Cubierta- Paredes exteriores
3.710.014	Cubierta- Placa inferior
3.710.015	Cubierta- Paredes divisorias
3.710.016	Cubierta- Estructura de armadura exterior

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

3.710.017	Cubierta- Misceláneos
3.710.018	Ductos de destilado
3.710.019	Canales de destilado
3.710.031	Tubos de condensado primeras etapas de sección de recuperación
3.710.032	Tubos de condensado etapas restantes de sección de recuperación
3.710.033	Tubos de condensado sección de retorno
3.710.041	Placas tubulares en primeras etapas de sección de recuperación
3.710.042	Placas tubulares en etapas restantes de sección de recuperación
3.710.043	Placas tubulares sección de retorno
3.710.051	Soportería de tubería en sección de recuperación
3.710.052	Soportería de tubería en sección de retorno
3.710.061	Cámara de agua en sección de recuperación
3.710.062	Cámara de agua en sección de retorno
3.710.071	Difusor de vapor de condensación

En primera instancia, los costos del material para cada uno de los componentes deben ser determinados. Dado que no se considera material de desperdicio, los costos del material serán obtenidos de los costos de la producción individual de cada material.

Para las hojas, moldes y tubos necesarios para manufacturar las partes, se utilizarán distintos materiales que deberán ser bien conocidos para el cálculo; aquí, los precios asumidos para los materiales, deberán ser considerados como variables y deberán ser adaptados a los precios comerciales vigentes. Los costos de material serán determinados al multiplicar los precios por unidad de peso por el peso del elemento terminado.

Los pesos de cada una de las partes se calcularán a partir de sus dimensiones y de la densidad de los materiales utilizados. Las dimensiones de cada elemento serán obtenidas del diseño del evaporador y de los valores obtenidos de la experiencia. El espesor del material de las placas y moldes dependerá del material seleccionado.

Las longitudes de las placas inferiores, placas tubulares, paredes divisorias, paredes laterales y dimensiones del condensador estarán determinados por el diseño térmico e hidráulico del evaporador. Lo mismo es aplicable para la cantidad de placas tubulares y paredes divisorias.

El ancho de las paredes exteriores corresponde a la longitud del tubo en la porción superior, pero se incrementará en la porción inferior. Se asume que el recorrido del destilado no es mayor

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

que el conjunto de tubos. La altura de las paredes laterales y exteriores tendrá cerca de 1.90 m adicionales a la altura de la placa tubular. La cantidad de paredes divisorias y de las placas tubulares estará determinada por el número de etapas.

El peso y los costos del material de los elementos misceláneos también contenidos en el evaporador (3.710.017) representan un 5% del peso total de los costos de material de la cubierta (3.710.011 a 3.710.016).

El peso de la estructura de la armadura exterior de acero al carbón, representa un 50% del peso de la placa de la cubierta asociada (3.710.011 a 3.710.014).

La longitud, diámetro y cantidad de tubos condensadores (3.710.031 a 3.710.033) se obtendrá del cálculo termodinámico. El espesor de pared necesario se obtendrá a partir del material empleado, así como de las condiciones del proceso (velocidades del flujo, pH, valores del agua, etc.). Dado que los tubos condensadores son responsables de una gran porción de los costos del material, los costos del material específico deberán ser determinados de acuerdo a los precios vigentes y con la mayor precisión posible.

La longitud y ancho de las placas de soporte (3.710.051 a 3.710.052) se obtendrá del estudio termodinámico. La cantidad de placas de soporte por etapa, se obtendrá de la longitud dividida entre el espaciamiento de 1.25 m.

Para determinar el peso del material de las cámaras de agua (3.710.061, 3.710.062), se asumirá que un canal es regido por la placa tubular del siguiente. La altura del canal es la misma que de la placa tubular. El ancho del canal es calculado, asumiendo una velocidad del flujo máxima de 2.5 m/s.

Los costos de los difusores de vapor de condensación serán tomados a partir de las áreas de superficie del difusor, obtenidas del cálculo termodinámico. El precio de difusor en términos de $\$/m^3$ es variable. La altura del difusor se ubica en 100 mm.

Los costos de producción para el evaporador dependerán de los costos de los materiales, costos de fabricación y el desperdicio del material.

Los costos de fabricación y el desperdicio de los materiales se sumarán consecutivamente, haciendo referencia a las horas por unidad de peso. Los tiempos calculados de producción harán referencia a la región donde se fabricará el elemento. Una corrección subsecuente se tomará con la ayuda de un factor de productibilidad variable que se definirá en cada país específicamente. Las horas de producción determinadas de esta manera serán entonces multiplicadas por las tasas horarias correspondientes. La tasa horaria es variable y dependerá del trabajo a realizarse. El excedente en la producción se calculará como un porcentaje de los costos de producción.

Los costos relacionados con la perforación de los elementos se calcularán separadamente. Para ello, el tiempo requerido dependerá de la operación de perforado, que a su vez dependerá del material y del espesor. Los costos serán calculados partiendo de las tasas horarias.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

La información utilizada para calcular los costos de inversión se puede agrupar de la siguiente manera:

<i>Número de Parte</i>	<i>Material</i>	<i>Espesor (mm)</i>	<i>Costo (\$/kg)</i>
3.710.011	<i>Sólido: 316L</i>	<i>15</i>	<i>3.50</i>
	<i>Recubrimiento: 316L/CS</i>	<i>18+2.5</i>	<i>3.10</i>
3.710.012	<i>Sólido: 316L</i>	<i>15</i>	<i>3.50</i>
	<i>Recubrimiento: 316L/CS</i>	<i>18+2.5</i>	<i>3.10</i>
3.710.013	<i>Sólido: 316L</i>	<i>15</i>	<i>3.50</i>
	<i>Recubrimiento: 316L/CS</i>	<i>18+2.5</i>	<i>3.10</i>
3.710.014	<i>Sólido: 316L</i>	<i>15</i>	<i>3.50</i>
	<i>Recubrimiento: 316L/CS</i>	<i>18+2.5</i>	<i>3.10</i>
3.710.015	<i>Sólido: 316L</i>	<i>15</i>	<i>3.50</i>
3.710.016	<i>Sólido: CS</i>		<i>0.63</i>
3.710.018	<i>Sólido: 316L</i>		<i>3.50</i>
3.710.019	<i>Sólido: CS</i>	<i>4</i>	<i>3.50</i>
3.710.031	<i>Titanio</i>	<i>0.4</i>	<i>31.25</i>
	<i>CuNi70/30</i>	<i>1</i>	<i>7.63</i>
3.710.032	<i>Titanio</i>	<i>0.4</i>	<i>31.25</i>
	<i>CuNi90/10</i>	<i>1</i>	<i>5.95</i>
	<i>CuZn20Al</i>	<i>1</i>	<i>4.00</i>
3.710.033	<i>Titanio</i>	<i>0.4</i>	<i>31.25</i>
3.710.041	<i>CuNi90/10</i>	<i>50</i>	<i>7.50</i>
3.710.042	<i>CuNi90/10</i>	<i>50</i>	<i>7.50</i>
3.710.043	<i>CuNi90/10</i>	<i>50</i>	<i>7.50</i>
3.710.051	<i>316L</i>	<i>10</i>	<i>3.50</i>
3.710.052	<i>316L</i>	<i>10</i>	<i>3.50</i>
3.710.061	<i>Recubrimiento: CuNi90/10/CS</i>	<i>15+2.5</i>	<i>6.25</i>

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

3.710.062	Recubrimiento: CuNi90/10/CS	15+2.5	6.25
3.710.071	316L	100	365.00

*CS: acero templado (cast steel), 316L: Tipo de Acero Inoxidable

Los costos de fabricación así como el factor de costo indirecto son:

Operación	Salario (\$/h)*	Factor de aumento (%)
Soldado	25	250
Perforado	25	500
Entubado	15	180

*Los salarios anteriores son en dólares, según los salarios percibidos en Alemania

Los tiempos de producción son considerados entre 0.03 a 0.1 horas por kilogramo.

Los tiempos de perforación por cada orificio serán como sigue:

Material	Tiempo (horas/mm)
CuNi90/10	0.0000061
316L	0.00026

Lo anterior se aplica para un tamaño estandarizado de orificios, también se puede apreciar que la aleación de Cupro-Níquel es significativamente más blanda que el acero inoxidable 316L, por lo que el rendimiento en la perforación del primer material será significativamente mayor al rendimiento en la perforación del acero inoxidable.

Hasta ahora hemos realizado para fines ilustrativos, un desglose del cálculo del costo del evaporador, a continuación se hará mención a los demás elementos que integran el sistema desalinizador, no se describirán con tanto detalle por tratarse de un proceso muy extenso, que rebasaría los objetivos del presente trabajo.

Calentador de salmuera

El costo del calentador de salmuera puede ser calculado con suficiente aproximación considerando el precio actual de algún equipamiento del que se tenga conocimiento de su precio, haciendo la respectiva adecuación para una cierta área de intercambio de calor, de acuerdo a la siguiente correlación:

$$V_B = V_0 * (A_B/A_0)^{0.6} \text{ (dólares)}$$

V_B = Costo total del equipo del calentador de salmuera

V_0 = Costo total del equipo del calentador de salmuera de referencia

A_B = Área total de intercambio de calor del calentador de salmuera

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

A_0 = Área total de intercambio de calor del calentador de salmuera de referencia

El costo del calentador de salmuera de una planta de 54,000 m³/día con una superficie de 10,277 m² es de 3.3 millones de dólares (total del equipo instalado), resultando un precio para un calentador de 100,000 m³/día de 4.85 millones de dólares.

Aereador

El precio del aereador de una planta recirculadora de salmuera se incluirá en los costos agrupados, considerados como un porcentaje de los costos totales calculados.

Estructura de acero

El costo de la estructura de acero de la planta será considerablemente mayor que el de una planta convencional, pese a haber prescindido de diversos componentes. Dada la elevación del evaporador, se requirieron columnas de acero más elevadas, escaleras más largas y plataformas adicionales, adicionalmente, las columnas deberán ser más resistentes para resistir las cargas dinámicas. Los costos no se calculan a detalle, pero un 100% de incremento en el precio de la estructura podría considerarse suficiente.

Bombas

Para determinar la influencia de las bombas de abastecimiento del agua salada en el costo total, un estimado de los precios de las bombas se puede realizar basándose en la información proporcionada por los fabricantes. El estimado se realiza extrapolar los precios dados por las bombas con sus respectivas especificaciones. Regularmente será necesario considerar arreglos de bombas trabajando en paralelo dado que el mercado no cuenta con bombas de la magnitud requerida para capacidades de desalinización considerables.

El precio de las bombas es dependiente del gasto proporcionado, así como la carga, entre otros factores. El precio de la bomba puede ser estimado como una función de la carga y gasto utilizando una correlación del tipo:

$$P_P = P_{P0} * (F/F_0)^{K_1} * (H/H_0)^{K_2} * K_3$$

P_P : Precio de la bomba a calcular (dólares)

P_{P0} : Precio de la bomba conocida (dólares)

F, F_0 : Flujo o gasto de la bomba (a calcular y ofrecida) m³/h

H, H_0 : Carga entregada (a calcular y ofrecida) m

K_1 : Constante (0.8...0.6)

K_2 : Constante (0.55)

K_3 : Factor de corrección (e. g. uso de otro material)

Deberá de tenerse en cuenta que la expresión definida puede brindar un precio estimado de compra para bombas que son de diseños similares. Si las condiciones operaciones varían

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

sustancialmente (especialmente bajo cargas elevadas), el precio de la bomba se puede incrementar bruscamente, dado que deberán tomarse medidas especiales de diseño. La carga y el gasto estarán determinados por el cálculo termodinámico de las diversas alternativas del evaporador.

En el cálculo de los costos de inversión, se consideran motores eléctricos para propulsar los mecanismos de las bombas y estarán definidos por el mismo principio que el de las bombas. Según la experiencia, la siguiente correlación se puede utilizar para estimar los costos de los motores de las bombas:

$$P_M = 312,500 * (N_M/3,700)^{1.15}$$

P_M : Precio del motor de 11 KV en dólares

N_M : Potencia del motor de 11 KV a 745 RPM en KW

Los resultados obtenidos de la expresión anterior pueden brindar una aproximación lo suficientemente precisa dentro de cierto rango exclusivamente.

Todas las demás bombas utilizadas en los diversos procesos se calculan con expresiones similares preparadas para cada tipo respectivo de bomba.

Tuberías y válvulas

Las tuberías, así como las válvulas son consideradas como material misceláneo, por lo que serán calculadas como un porcentaje de los costos del equipo (i.e. costos del evaporador, calentador de salmuera, bombas, etc.). Este porcentaje estará relacionado con el material seleccionado y determinado por la experiencia. Solamente las tuberías de conexión, a diferencia de las de transferencia serán calculadas con precisión.

Sistema de vacío

El sistema de vacío puede ser calculado con suficiente aproximación considerando los precios actuales de los sistemas de vacío y adaptándolos para otro sistema de acuerdo a la siguiente relación:

$$P_V = P_{V0} * (S_V / S_{V0})^{0.6}$$

P_V : Costo total del equipo de vacío (dólares)

P_{V0} : Costo total del equipo de vacío de referencia (dólares)

S_V : Capacidad total del evaporador (m^2)

S_{V0} : Capacidad total del evaporador de referencia (m^2)

El sistema de vacío será considerado como un solo elemento del equipo. Al utilizar la correlación mencionada, se asumirá que se utilizan los mismos materiales y las mismas condiciones de operación. El precio de un sistema de vacío de una planta de 54,000 m^3 /día es de

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

1.5 millones de dólares (incluyendo cubierta y tubos de intercambio de calor). El precio a ser considerado para una planta de 100,000 m³/día es de 2.2 millones de dólares.

Costos Totales de Inversión

Los cálculos realizados de acuerdo al diseño establecido, para plantas MSF de 100,000m³/día, arrojan como resultado:

1,190 dólares por m³/día

Lo que significa que el costo total de inversión para una planta de esta capacidad, es de aproximadamente 120 millones de dólares, lo que podría representar la alimentación de una ciudad de 500,000 habitantes.

Para una planta con aproximadamente la mitad de capacidad que la anterior, o sea 54,000 m³/día, el costo total de inversión sería aproximadamente 1,250 dólares por m³/día, o sea cerca de un 5% adicional.

Como otro ejemplo tenemos que en las Bahamas ha sido construida una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 10,000 m³/día. El capital invertido es de 10.7 millones de dólares, incluyendo la provisión de un tanque de 23,000 m³, una línea de suministro de electricidad de 2 kilómetros y un 7% de impuestos para los materiales importados que no son considerados normalmente como elementos de la planta. Si no se considera el costo de los elementos anteriormente mencionados, el monto del capital se reduce a 8.5 millones de dólares o bien 850 dólares por metro cúbico diario.

5.2 COSTOS DE OPERACIÓN

El costo de cada metro cúbico de agua producido puede variar debido a las condiciones locales, sin embargo, según la experiencia en diversos países como Pakistán, India, España, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, Estados Unidos, Bermudas, etc., este costo oscila entre 0.55 a 1.15 dólares, los valores más cercanos al límite inferior del rango son en procesos que involucran desalar agua salobre, mientras que los valores cercanos al límite superior corresponderán a la desalación de agua marina. Los costos de desalación para ciertas situaciones muy específicas llegan incluso a los cuatro dólares.

Estudios recientes tienden a apuntar a los procesos de membrana, como los más rentables; por ejemplo, algunos estudios realizados por el Departamento de Agua y Electricidad de Abu Dhabi (E. A. U.) revelan que una planta de ósmosis inversa (considerando una tasa de interés del 8% y reemplazo de membranas cada cinco años) produce agua potable a razón de 0.95 dólares/m³, mientras que una planta destiladora en etapas múltiples produciría agua a un costo de 1.06 dólares/m³, el dato más interesante consiste en un ahorro del 10.5%, o sea 8.2 millones de dólares anuales, al utilizar conjuntamente la planta de ósmosis inversa con una destiladora para obtener una producción total de 190,000 m³/día. Adicionalmente, si se considera un período de depreciación de 30 años en lugar de 20, el costo se reduce a 0.91 dólares por metro cúbico, pero

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

considerando este mismo período de depreciación pero una vida útil de las membranas de cuatro años, nuevamente el costo se convierte en 0.95 dólares por metro cúbico.

En las Bahamas el costo total de producción del agua para la planta de ósmosis inversa anteriormente mencionada, es de 1.25 dólares por metro cúbico considerando un factor de abastecimiento del 91% durante 15 años, un costo de electricidad de 0.156 dólares/kWh y un costo del combustible diesel a 0.20 dólares por litro. Sin embargo, si se excluyen los elementos que no son componentes directos de la planta en el costo total de la inversión y se considera el costo de electricidad en 0.10 dólares/kWh, el precio por metro cúbico desciende a 1.13 dólares por metro cúbico.

En la planta destiladora descrita y propuesta en el apartado de construcción, gracias a ciertas mejoras como la utilización de procesos que no recirculen el concentrado, la reducción de los factores de elementos contaminantes, el prescindir de equipos de refaccionamiento colocando el evaporador en una cota mayor para suprimir equipos de bombeo, el utilizar acero inoxidable en el evaporador, el no utilizar ningún sistema de recirculación de agua refrigerante, el utilizar sistemas de vacío más económicos así como el uso de bombas de velocidad controlada para prescindir de las válvulas de control; logrará una reducción considerable en los costos de producción, lográndose para una tasa de interés del 8% un decremento de 0.69 a 0.56 dólares por metro cúbico.

Recientemente Calder Ltd., Calder AG y Wheatley Gaso, Inc., realizaron un estudio comparativo en el que intervenían diversas plantas de ósmosis inversa en distintas regiones del mundo, también, el estudio incluye comparativos en el costo al involucrar dispositivos de recuperación de energía, los resultados de dicho estudio se resumen en la Figura 5. 4 Costo de desalar agua marina con ósmosis inversa.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

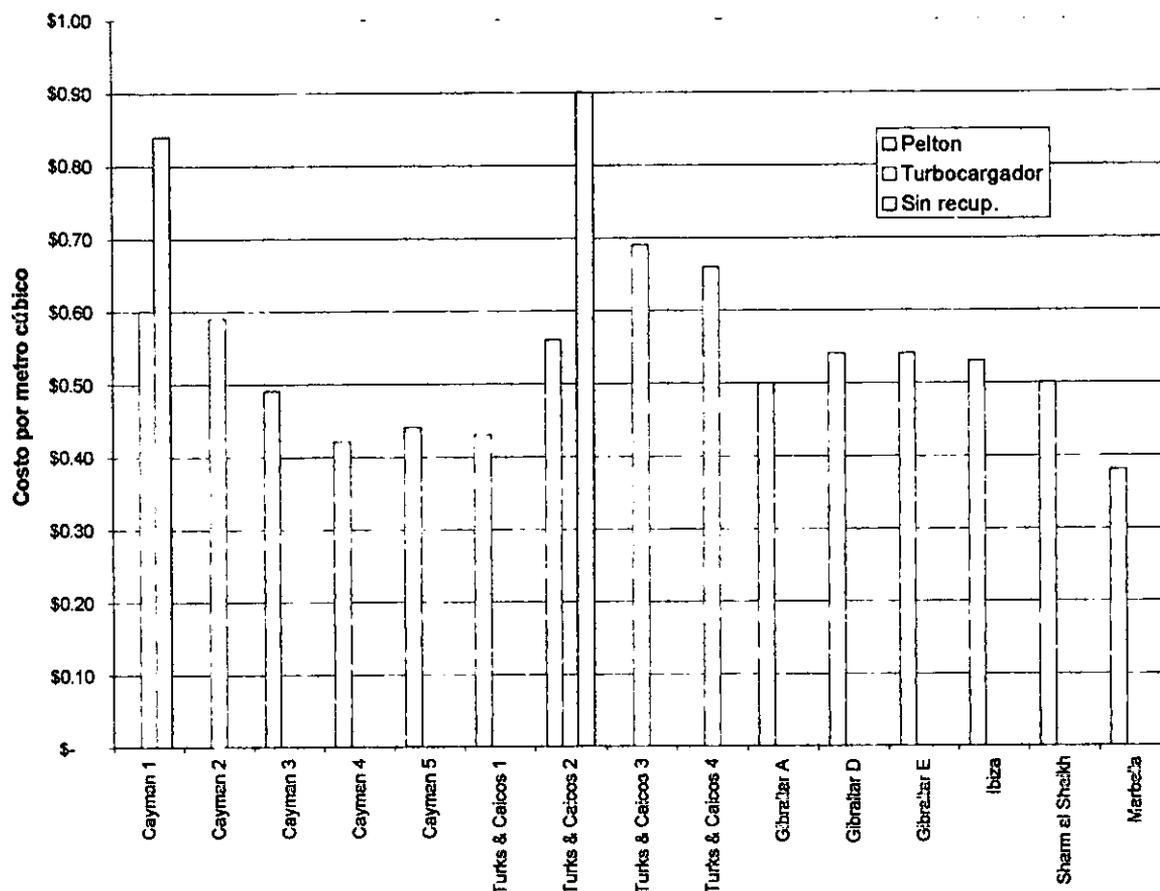


Figura 5. 4 Costo de desalar agua marina con ósmosis inversa

Para el caso particular de México, dada su cercanía geográfica con una de las naciones líderes en tecnologías de desalinización, así como su característica de ser uno de los principales productores de petróleo y gas natural, el costo de producción de cada metro cúbico bien podría ubicarse cerca de los 80 centavos de dólar, incluyendo los costos de amortización, lo que no resulta excesivo comparado con los costos de extracción de agua dulce en ciertas regiones, donde los mantos han sido sobreexplotados y muestran claros indicios de intrusión marina o incluso, se encuentran altamente contaminados.

Las plantas de ósmosis inversa se han repuntado como las más rentables, más aún cuando se incluyen dispositivos de recuperación de energía, por lo que se prevé que esta tecnología será la que domine el mercado de producción de agua desalinizada.

De manera general, los costos de operación estarán compuestos de los costos de las sustancias químicas empleadas en los procesos, los salarios, sueldos y honorarios del personal que labora,

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

los costos de los energéticos utilizados para la operación de la planta, así como los costos de las refacciones.

Para fines simplificados, los costos de operación se dividen en tres categorías:

- Energía
- Operación y Mantenimiento
- Depreciación e Interés

En general cada uno de estos conceptos representa aproximadamente un tercio del valor del costo total de producción.

ENERGÍA

La Figura 5. 5 Costo de la energía para una planta de ósmosis inversa, muestra la variación en los costos de la energía para una planta de ósmosis inversa en función del caudal producido.

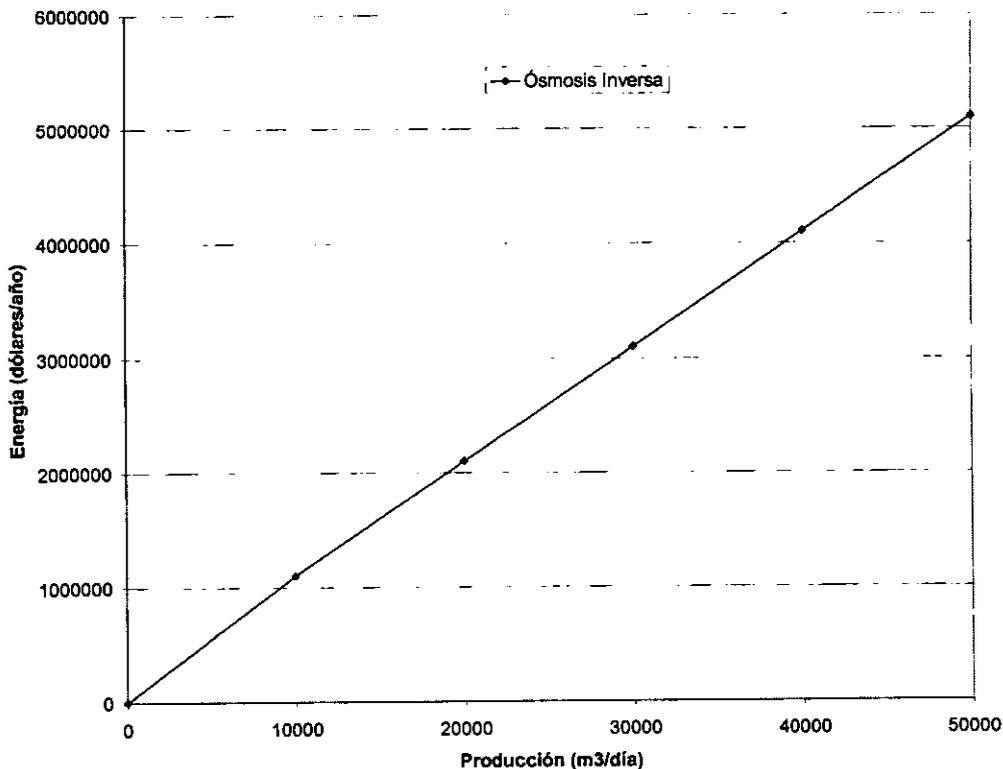


Figura 5. 5 Costo de la energía para una planta de ósmosis inversa

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Para el caso de la planta de Son Tugores, ubicada en Palma de Mallorca (Baleares), cuya producción es de 30,000 m³ diarios, los costos promedio de energía se encontraban cerca de los 16 centavos de dólar por metro cúbico.

Para las plantas de ósmosis inversa es muy importante considerar dispositivos de recuperación de energía así como encontrar la corriente eléctrica de alimentación óptima. Este último parámetro tiene un peso similar al uso de turbinas de recuperación de energía, por lo que será indispensable tenerlo en cuenta.

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

En lo que respecta a los costos de mantenimiento (sin considerar los sueldos y salarios), la experiencia ha arrojado los siguientes resultados:

- a) Para plantas destiladoras, se considera un 2.5% sobre el costo de la inversión inicial en el equipo para cada año.
- b) Para plantas de ósmosis inversa, se considera un 2.5% anual, del costo de la inversión inicial, sin tomar en cuenta el costo de las membranas.

Los costos de los productos químicos utilizados en los procesos de desalinización, de acuerdo a la experiencia se pueden considerar como sigue:

- Plantas destiladoras: 5.52 centavos de dólar por m³
- Plantas de ósmosis inversa: 7.60 centavos de dólar por m³

En una planta desalinizadora típica, las siguientes dosificaciones son válidas por cada metro cúbico de agua producido, para calcular los costos, será necesario conocer los precios de los proveedores más cercanos, la siguiente tabla puede resultar de interés:

Sustancia	Cantidad (ppm)
Coagulante	5
Polielectrolito	0.1
Ácido	25
Antiescalante	3
Removedor de oxígeno	5
Hipoclorito (producto)	1
Cal (producto)	20

En la Universidad de Alicante existe una pequeña planta de ósmosis inversa que desala agua salobre, cuya capacidad es de 450m³/día. Dicha planta cubre las necesidades de abasto del vital líquido para los dormitorios del campus, las zonas de aulas, propósitos de investigación, e

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

incluso, diluyéndola con agua salobre y sin haber recibido hidróxido de calcio para irrigación. Los costos de los productos químicos se enlistan a continuación:

Sustancia	Costo centavos de dólar/m ³
Antiescalante (3 a 5 ppm)	2.46
Ácido hidroclicóric (hasta un pH=6.8)	1.21
Hipoclorito de sodio (0.5 ppm post-tratamiento)	0.06
Soluciones limpiadoras (estimado)	0.01
Hidróxido de calcio (60 ppm)	1.72
Total	5.45

Como se puede observar en la tabla anterior, no se utilizan ciertas sustancias por no ser requeridas dado que la fuente es agua salobre, el agua marina superficial deberá utilizar todos los químicos necesarios para evitar la sedimentación, lograr la precipitación de sólidos disueltos, etc.

Sin tomar en cuenta los costos de financiamiento, dado que dicha planta fue construida con presupuesto propio de la Universidad de Alicante, así como excluyendo los costos del personal, la distribución del costo es como se muestra en la Figura 5. 6 Distribución de costos de operación y energía.

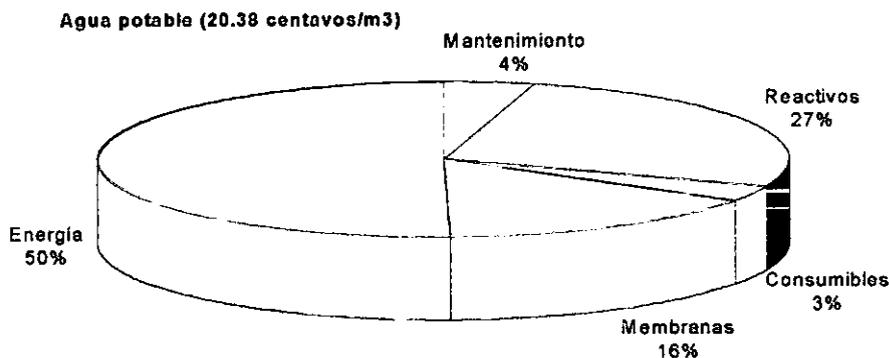


Figura 5. 6 Distribución de costos de operación y energía en la planta de la Universidad de Alicante

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

El agua utilizada para riego en la Universidad de Alicante, no requiere la adición de hidróxido de calcio, por lo que el costo de producción para estos fines sería de 18.66 centavos de dólar.

Las membranas utilizadas en las plantas de ósmosis inversa se suelen reemplazar cada cinco años, sin embargo, este valor se puede reducir según las condiciones del agua entrante, el mantenimiento así como la dosificación de las sustancias.

Los costos de refacciones que incluyen todas las partes y materiales usados en el mantenimiento correctivo de la planta, así como todos los consumibles tales como cartuchos y filtros pueden considerarse como un 1.5% de costo total de la planta para las partes electromecánicas así como un 0.5% para la parte civil.

Los costos relativos a sueldos y salarios del personal, pueden partir de la idea de contar con cinco elementos en operación las 24 horas del día. La cantidad total de personal varía de acuerdo al tamaño y complejidad de la planta, regularmente se encuentra en un rango de 25 a 40 trabajadores en diversas categorías profesionales.

En la planta de Son Tugores, cuya capacidad es de 30,000 m³, el personal que requerido para su operación es el siguiente:

<i>Personal directivo</i>	<i>2 personas</i>
<i>Personal administrativo</i>	<i>1 persona</i>
<i>Personal de laboratorio</i>	<i>1 persona</i>
<i>Personal operativo</i>	<i>5 turnos x 2 personas/turno = 10 personas</i>
<i>Personal de mantenimiento de instrumentos y de equipo eléctrico</i>	<i>2 personas</i>
<i>Personal de mantenimiento de equipo mecánico</i>	<i>3 personas</i>
<i>Personal de limpieza y mantenimiento en general</i>	<i>5 personas</i>
<i>Total</i>	<i>24 personas</i>

El personal descrito arriba causa un costo por cada metro cúbico de 5 centavos de dólar.

DEPRECIACIÓN E INTERÉS

En la mayor parte de los casos, los costos por depreciación, amortización del capital e intereses, suelen representar una porción significativa del costo total de producción. Para el caso de la planta ubicada en Palma de Mallorca, de un costo total de 93 centavos de dólar en el año de 1997, 35 correspondían a los costos de financiamiento, lo que significa alrededor de un 38%.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Como se puede apreciar en la Figura 5. 6 *Distribución de costos de operación y energía en la planta de la Universidad de Alicante, el porcentaje que pertenece al costo del energético es de la mitad. Considerando que el costo de financiamiento fuera similar al del energético, tendríamos que cada uno de los elementos que integran los costos de operación tendría una participación del 33% cada uno.*

5.3 FINANCIAMIENTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN

Dado que la capacidad de las plantas desalinizadoras continúa incrementándose, también tienen que hacerlo los costos de inversión así como los presupuestos para la operación. Algunos organismos gubernamentales de distintas naciones han empezado a considerar sociedades mixtas, donde tiene participación el estado así como los particulares donde buena parte de las labores de financiamiento y operacionales son delegadas a empresas privadas. Este nivel de asociación puede variar desde un contrato de operación y mantenimiento de la planta a un contrato de construcción, operación y transferencia (en inglés build-operate-transfer BOT), a una concesión a largo plazo, o incluso, una posesión y operación de la planta por parte del sector privado.

Bajo un arreglo contractual de un proyecto BOO (del inglés build-own-operate, construir, poseer y operar) y de un proyecto DBOO (se delega también el diseño), el socio particular brinda el capital para el diseño, construcción y operación de la planta desalinizadora por un período fijo, que puede variar de los quince a los treinta años, logrando la recuperación de la inversión, vendiendo el agua en su unidad básica. Las ventajas de los diversos modelos de privatización son considerables debido a que los riesgos técnicos y económicos se minimizan y permiten un financiamiento a largo plazo de los costos de inversión de la planta, logrando una reducción en la carga financiera de la comunidad.

Tipo	Propiedad	Capital	Duración de la Inversión
Contrato de servicios	Pública	Público	1 a 5 años
Arrendamiento	Pública	Público	25 a 30 años
Concesión	Pública	Privado	25 a 30 años
BOO/BOOT/DBOO	Privada y pública	Privado	20 a 30 años

El tiempo de amortización se suele calcular en 20 años para el equipo electromecánico y de 30 años para la obra civil.

Las tasas de interés juegan un papel preponderante en el costo del producto final, por ejemplo, para una planta de ósmosis inversa que produzca 190,000 m³/día el costo por cada metro cúbico producido se incrementará según se muestra en la Figura 5. 7 Costo del agua respecto a las tasas de interés.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

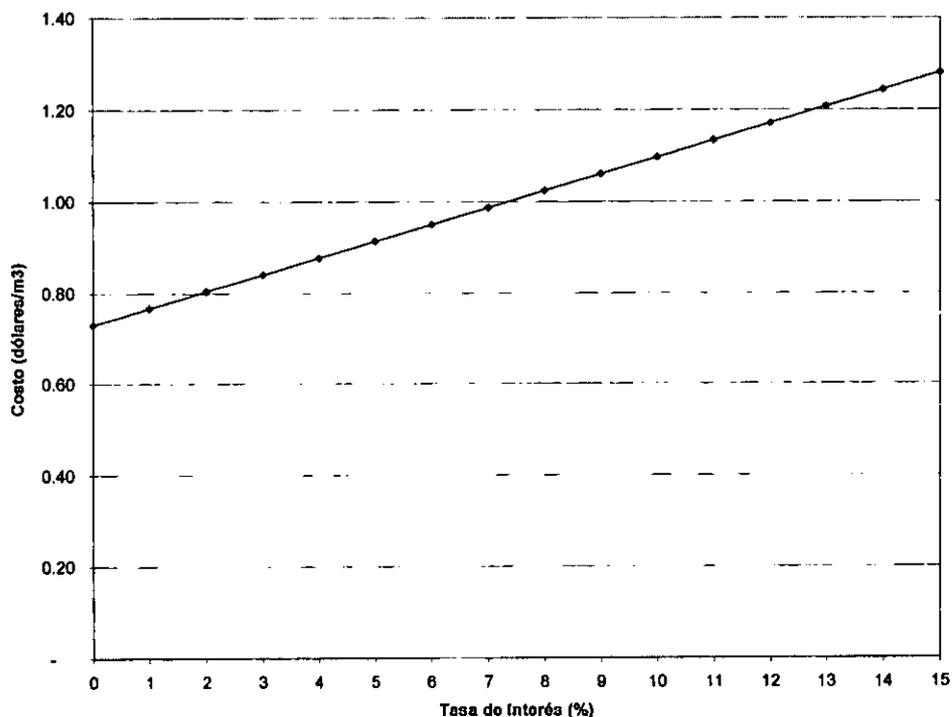


Figura 5. 7 Costo del agua respecto a las tasas de interés

FINANCIAMIENTO EN MÉXICO

Los diversos modelos de financiamiento de agua desalinizada utilizados en diversas naciones, pueden extrapolarse a las condiciones financieras de nuestro país, sin embargo, será muy importante tener en cuenta los lineamientos en materia de servicios. La Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) junto con la Comisión Nacional del Agua, dentro de su programa de desarrollo hidráulico del año 2000 establecen lo siguiente:

Para propiciar la sustentabilidad y autosuficiencia financiera del desarrollo hidráulico, se han asumido los siguientes objetivos:

1. Adecuar sistemáticamente la política fiscal del sector hidráulico, incidiendo en la redefinición de los derechos así como en los niveles de recaudación.
2. Integrar los recursos de la federación, los estados y municipios para realizar programas específicos establecidos de común acuerdo.
3. Fortalecer las finanzas como un instrumento de política fundamental para eliminar progresivamente los subsidios innecesarios.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

4. *Diversificar las fuentes de financiamiento, incluyendo la participación del sector privado, con objeto de lograr una mayor concurrencia de recursos hacia los programas de desarrollo hidráulico.*

Las directrices de los organismos regidores en materia hidráulica son muy claras, se establece una abierta determinación para lograr incrementar los niveles de recaudación, se manifiesta la necesidad de la participación de todos los niveles de gobierno en la planeación, se promueve una eliminación de los subsidios para aquellos casos donde no tengan lugar y se invita al sector privado para participar en la consecución de los objetivos.

Lo anterior nos permite vislumbrar una tendencia clara a realizar el cobro del vital líquido de forma más intensiva, e incluso, nos pone de manifiesto que en aquellos casos donde no haya justificación, se incrementarán los precios al consumidor final. La reducción en los subsidios resulta razonable para aquellas comunidades de recursos medios, donde exista la capacidad económica de poder realizar la erogación sin impactar a los núcleos familiares, sin embargo, para aquellos casos donde existan comunidades con niveles de pobreza extrema, el gobierno en sus diversos niveles se verá obligado a otorgar más y mayores subsidios, sobre todo si se trata de dotar a estas comunidades con un recurso hidráulico de calidad adecuada que cubra exclusivamente las necesidades más elementales (para beber y cocinar), lo que entre otras cosas produciría un ahorro en los recursos destinados a salubridad, al reducirse los niveles de enfermedades infecciosas.

En materia de recaudación, ya han sido tomadas las primeras medidas, a continuación se muestran, de acuerdo al propio informe de la CNA en lo que se refiere a la recaudación de las contribuciones por uso o aprovechamiento de las aguas nacionales y sus bienes inherentes, así como por la prestación de los servicios hidráulicos a cargo de la CNA. Se ha logrado que los usuarios instalen dispositivos para disminuir la extracción de los volúmenes de agua, principalmente en zonas donde los acuíferos están sobreexplotados y las cuotas de los derechos por uso de aguas nacionales son más altas.

El rango de cuotas domésticas, comerciales e industriales en las diversas entidades federativas es muy variado, regularmente refleja la disponibilidad de mantos de agua dulce en cada una de las regiones, sin embargo, en el Cuadro 5. 3 se puede apreciar que existen algunas entidades del norte y centro del país donde el precio al usuario final sigue siendo excesivamente bajo acarreado como consecuencia directa, un subsidio innecesario por parte de los diversos niveles de gobierno. En otras entidades como Baja California Sur por ejemplo, se muestra un incremento sustancial de 1995 a 1997, sobre todo en los valores máximos, lo que refleja el encarecimiento de fuentes convencionales de agua para dicha entidad.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 3
TARIFAS PROMEDIO DE AGUA POTABLE POR TIPO DE USO
SEGUN ENTIDAD FEDERATIVA
1995-1998 (Pesos por m³)

ENTIDAD FEDERATIVA	DOMÉSTICA		COMERCIAL		INDUSTRIAL	
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÁXIMA
1995						
<i>Aguascalientes</i>	1.79	15.78	2.72	11.14	3.45	14.06
<i>Baja California</i>	0.38	2.17	2.48	4.95	2.48	4.95
<i>Baja California Sur</i>	0.58	5.36	1.61	5.36	2.17	5.36
<i>Campeche</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Coahuila</i>	0.48	3.11	1.53	4.59	1.53	4.59
<i>Colima</i>	0.67	1.95	1.03	1.95	1.03	1.95
<i>Chiapas</i>	0.48	2.3	1.06	2.55	1.85	3.05
<i>Chihuahua</i>	1.03	4.11	1.07	4.11	1.07	4.11
<i>Distrito Federal</i>	0.6	4.05	1.5	7.15	1.5	7.15
<i>Durango</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Guanajuato</i>	1.24	3.93	1.63	4.99	ND	ND
<i>Guerrero</i>	2	26.75	2	26.75	2	26.75
<i>Hidalgo</i>	0.7	1.71	1.16	1.87	1.02	1.97
<i>Jalisco</i>	0.83	3.45	2.07	21.35	2.08	21.35
<i>México</i>	0.45	2.46	1.01	5.15	1.01	5.15
<i>Michoacán</i>	0.69	1.01	2.5	2.5	3.5	3.5
<i>Morelos</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Nayarit</i>	0.74	3.05	1.84	18.95	1.84	18.95
<i>Nuevo León</i>	1.37	6.13	1.99	7.32	1.99	7.32
<i>Oaxaca</i>	0.64	1.9	0.64	1.9	0.64	1.9
<i>Puebla</i>	0.95	1.79	1.45	3.28	1.45	3.28
<i>Querétaro</i>	0.69	7.86	1.91	13.88	2.86	15.68
<i>Quintana Roo</i>	0.6	11.29	2.19	18.3	1.34	23.33

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

<i>San Luis Potosí</i>	0.45	3.9	1.32	2.4	1.86	4
<i>Sinaloa</i>	0.85	2.73	1.59	3.17	2.03	3.88
<i>Sonora</i>	0.77	4.4	2.2	2.97	2.2	2.97
<i>Tabasco</i>	0.17	1.3	0.95	1.88	1.5	2.12
<i>Tamaulipas</i>	0.7	1.95	1.23	2.93	1.71	3.51
<i>Tlaxcala</i>	1.5	11.2	2.5	23	ND	ND
<i>Veracruz</i>	0.4	1.94	1.12	2.13	1.23	2.34
<i>Yucatán</i>	0.75	3.2	1.75	4.45	1.75	5.35
<i>Zacatecas</i>	0.8	13.45	3.2	13.45	2	9.6
1997						
<i>Aguascalientes</i>	2	12.12	3.25	16.2	3.8	16.31
<i>Baja California</i>	0.65	3.85	4.14	7.72	4.14	7.72
<i>Baja California Sur</i>	1.38	12.37	3.21	13.74	5.13	14.75
<i>Campeche</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Coahuila</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Colima</i>	1.1	3.1	1.63	3.1	1.63	3.1
<i>Chiapas</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Chihuahua</i>	1.99	7.14	2.61	7.14	2.61	7.14
<i>Distrito Federal</i>	1	17.25	4	20.25	4	20.25
<i>Durango</i>	0.46	1.88	0.58	1.93	1.14	3.89
<i>Guanajuato</i>	1.2	3.83	1.59	4.85	ND	ND
<i>Guerrero</i>	2.3	16.35	4.45	18.78	5.74	21.6
<i>Hidalgo</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Jalisco</i>	1.2	6.7	3.3	33.95	3.3	33.95
<i>México</i>	0.7	3.86	1.58	8.08	1.58	8.08
<i>Michoacán</i>	0.97	1.57	3.17	5	4.3	5
<i>Morelos</i>	0.64	2.43	1.27	4.86	1.91	7.29
<i>Nayarit</i>	0.74	3.75	ND	ND	ND	ND
<i>Nuevo León</i>	0.94	17.75	5.95	12.49	5.95	12.49
<i>Oaxaca</i>	0.64	1.9	ND	ND	ND	ND
<i>Puebla</i>	1.52	2.85	2	4.55	2	4.55

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

<i>Querétaro</i>	0.76	8.59	2.09	15.16	3.12	17.13
<i>Quintana Roo</i>	0.67	14.8	2.23	25.4	1.34	31.09
<i>San Luis Potosí</i>	0.95	10	0.95	10	0.95	10
<i>Sinaloa</i>	1	3.2	1.86	3.71	2.39	4.54
<i>Sonora</i>	0.54	2.07	2.97	4.01	2.97	4.01
<i>Tabasco</i>	0.2	1.47	1.08	2.12	1.7	2.4
<i>Tamaulipas</i>	1.24	3.45	2.44	5.19	3.03	6.22
<i>Tlaxcala</i>	1.73	12.92	5.16	20.38	ND	ND
<i>Veracruz</i>	0.4	0.77	1.12	2.13	1.23	2.34
<i>Yucatán</i>	0.75	3.2	1.72	4.45	1.72	4.45
<i>Zacatecas</i>	0.88	14.8	3.52	14.8	3.77	16.9
1998						
<i>Aguascalientes</i>	2	12.12	3.25	16.4	3.8	16.31
<i>Baja California</i>	0.72	4.26	7.32	8.58	7.32	8.58
<i>Baja California Sur</i>	1.48	13.71	3.45	14.8	5.52	15.89
<i>Campeche</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Coahuila</i>	1.04	5.86	3	9.89	3	9.89
<i>Colima</i>	1.07	3.1	2.45	3.1	2.45	3.1
<i>Chiapas</i>	0.94	4.16	3.33	5.05	4.15	5.95
<i>Chihuahua</i>	1.05	11.58	4	11.06	4	11.06
<i>Distrito Federal</i>	1	20.3	4.71	23.85	4.71	23.85
<i>Durango</i>	1.5	1.58	2.01	1.93	3.95	3.89
<i>Guanajuato</i>	1.2	3.83	1.64	4.85	ND	ND
<i>Guerrero</i>	2.3	16.35	4.45	18.78	5.74	21.6
<i>Hidalgo</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Jalisco</i>	1.33	11.7	5.33	40.75	11.07	40.75
<i>México</i>	0.7	3.86	1.58	8.08	1.58	8.08
<i>Michoacán</i>	0.59	0.92	4.45	7.02	6.07	7.02
<i>Morelos</i>	0.86	3.31	1.74	6.62	2.6	9.94
<i>Nayarit</i>	1.73	6.45	2	7.34	ND	ND
<i>Nuevo León</i>	0.42	19.41	3.55	13.87	3.55	10.73

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Oaxaca	0.64	1.9	ND	ND	ND	ND
Puebla	1.61	3.02	2.12	4.83	2.12	4.83
Querétaro	0.7	4.92	1.91	4.92	2.86	4.92
Quintana Roo	0.78	17.31	2.58	29.56	1.55	37.13
San Luis Potosí	1.2	6.3	3.93	13.74	5.54	13.74
Sinaloa	1	3.2	1.86	3.71	2.39	4.54
Sonora	0.63	2.07	3	4.01	3	4.01
Tabasco	0.2	1.47	1.08	2.12	1.7	ND
Tamaulipas	1.24	3.45	2.44	5.19	3.03	6.22
Tlaxcala	2.18	16.34	3.16	19.92	ND	ND
Veracruz	0.75	1.46	0.22	4.02	23.5	4.42
Yucatán	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Zacatecas	1.05	29.23	4.2	21.07	5.63	7.12

NOTA: Las cifras corresponden a las capitales de cada entidad federativa.

FUENTE: CNA. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 1995, 1997 y 1998.

Con el fin de mejorar el sistema de recaudación e incrementar los montos percibidos, se llevan a cabo, entre otras, las siguientes acciones:

- Fortalecimiento del área de control de usuarios.
- Continuación de los programas de promoción de la cultura del pago, utilizando diversos medios de comunicación.
- Apoyo del control de usuarios con el desarrollo de sistemas sólidos de información.

Se han realizado acciones encaminadas a lograr que el valor del agua empiece a reflejarse en el cobro de derechos. Inicialmente, se han desligado los derechos de usuarios industriales de los municipales. Para motivar la participación de los usuarios en el tratamiento de aguas residuales, las cuotas por el uso de los cuerpos receptores para la descarga de aguas residuales se establecen ahora en función de las características del cuerpo receptor y de la carga contaminante. Se han establecido cuotas superiores al costo de tratamiento para inducir la instalación de plantas de tratamiento. Por otra parte, los usuarios del sector agropecuario y las comunidades con menos de 2,500 habitantes continúan exentos del pago de los derechos que marca la Ley Federal de Derechos.

Se han firmado contratos con ocho instituciones bancarias para la recepción de pagos por ventanilla, lo que ha permitido contar con aproximadamente cinco mil sucursales distribuidas en todo el país, para facilidad del contribuyente.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

La recaudación por concepto de derechos federales ha tenido importantes incrementos a partir de 1996, como se muestra en el Cuadro 5. 4 . Para el año de 1999 la recaudación fue de alrededor de 5,500 millones de pesos. Esta cifra duplica los ingresos obtenidos al inicio de la pasada administración y rebasa con mucho la meta original de 4,322 millones. Cabe mencionar que en ese resultado influyó la regularización de los adeudos que presentaban diversos contribuyentes, correspondientes a ejercicios anteriores.

Cuadro 5. 4

Recaudación por concepto de derechos federales		
Año	Recaudación (Millones de pesos)	Incremento
1995	2,850.4	—
1996	3,078.9	8.0%
1997	4,072.3	32.3%
1998	4,348.0	6.8%
1999	5,500.0	26.5%

Como se puede observar en el cuadro anterior, la recaudación se ha ido incrementando, lo que permitirá que de manera gradual se cobre por cada metro cúbico suministrado y consecuentemente existirá más liquidez para invertir en nuevos proyectos.

Aunque han existido avances en la recaudación, el camino por recorrer es aún muy largo, pues un total de recaudación de 5,500 millones de pesos resulta insuficiente para garantizar el abasto en los próximos años, pues en promedio, cada habitante aporta la cantidad de 55 pesos anuales (lo que alcanzaría para poco más de cinco metros cúbicos de agua desalinizada) para cubrir sus demandas de agua potable.

Uno de los principales retos para la presente administración, será el lograr incrementar la cantidad de agua facturada, con relación al agua producida, dado que los niveles de facturación en las principales poblaciones siguen siendo muy bajos respecto a los niveles de otras naciones, tal y como se puede apreciar en el Cuadro 5. 5.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 5

**VOLUMEN DE AGUA EXTRAIDA, FACTURADA Y NO CONTABILIZADA SEGÚN
ENTIDAD FEDERATIVA Y LOCALIDADES SELECCIONADAS 1995-1998**

ENTIDAD FEDERATIVA	1995			1997			1998		
	EXTR. mill. m ³	FACT. Mill. m ³	NO CONT. %	EXTR. Mill. m ³	FACT. mill. m ³	NO CONT. %	EXTR. mill. m ³	FACT. Mill. m ³	NO CONT. %
<i>Aguascalientes</i>									
<i>Aguascalientes</i>	88	57.2	35	88.9	44.5	49.9	88.9	44.5	50
<i>Baja California</i>									
<i>Ensenada</i>	ND	ND	ND	20	13.3	33.5	20.6	13.6	34.1
<i>Mexicali</i>	77.1	54.3	29.5	78.6	59.9	23.8	80.2	60.2	25
<i>Tijuana</i>	72.1	55.1	23.5	90	63.9	29	91.1	66	27.5
<i>Baja California Sur</i>									
<i>La Paz</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	20.9	14.9	28.6
<i>San José del Cabo</i>	ND	ND	ND	4.2	2.4	42.9	15.8	10.8	32
<i>Coahuila</i>									
<i>Piedras Negras</i>	ND	ND	ND	21.6	10.4	51.6	18.6	11.7	36.8
<i>Saltillo</i>	ND	ND	ND	10.8	5.5	49.5	49.5	21.4	56.7
<i>Torreón</i>	60.1	37.9	36.9	66	25.2	61.8	72.3	33.9	53.1
<i>Colima</i>									
<i>Manzanillo</i>	ND	ND	ND	3.7	2.2	41.3	5	2	59.8
<i>Chihuahua</i>									
<i>Cuauhtémoc</i>	8.3	4.3	47.6	9.3	4.7	49.5	9.4	4.9	48.2
<i>Chihuahua</i>	78.9	55.8	29.3	107.3	57	46.9	110.5	59.3	46.4
<i>Delicias</i>	18.8	11.3	39.9	20.8	10.1	51.6	5.6	2.8	50.4
<i>Durango</i>									
<i>Ciudad Lerdo</i>	6.7	3.2	52.1	7.1	2.9	59.9	9.8	3.3	66.1
<i>Durango</i>	57.3	30.1	47.5	51.1	11.8	76.9	ND	ND	ND
<i>Gómez Palacio</i>	27	18.7	31	9.5	6.4	32.8	28.7	12.9	55
<i>Guanajuato</i>									

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

<i>San Luis Potosí</i>	66.4	33.1	50.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Sinaloa</i>									
<i>Culiacán</i>	77	35.7	53.6	77.5	35.6	54	78.1	36.4	53.4
<i>Guamuchil</i>	9.4	3.3	65.4	9.6	4.2	56.3	9.6	4.2	55.9
<i>Los Mochis</i>	47.2	20.3	57	48.4	16.5	65.8	48.9	16.6	66.1
<i>Mazatlán</i>	55.9	24	57	55.9	26.3	52.9	56	27.2	51.5
<i>Sonora</i>									
<i>Ciudad Obregón</i>	61.4	31.8	48.2	65.1	35.7	45.2	65.7	32.4	50.6
<i>Hermosillo</i>	96	46.1	52	78.5	50.4	35.9	74.7	47.6	36.3
<i>Heroica Guaymas</i>	ND	ND	ND	25.1	9.3	62.9	22.3	9.3	58.5
<i>Heroica Nogales</i>	ND	ND	ND	17.7	13.2	25	20.2	13.7	32.4
<i>Navojoa</i>	16.8	5.7	66	17.7	6.7	62.1	16.3	5.8	64.7
<i>San Luis Río Colorado</i>	29.2	17.8	39	25.5	16.9	33.8	31.5	23.4	25.6
<i>Tamaulipas</i>									
<i>Ciudad Mante</i>	7.9	5.7	28	5.2	4.1	22.2	6	6	0
<i>Heroica Ciudad Victoria</i>	25.3	13.5	46.8	6.4	3.3	49.1	6.5	3.4	47.6
<i>Heroica Matamoros</i>	54.6	32.3	40.9	51	34.3	32.8	51	34.3	32.8
<i>Reynosa</i>	40.5	23.6	41.6	35	26.1	25.4	28.6	28.6	0
<i>Río Bravo</i>	8.6	4.2	51.1	7.8	4.9	37	17.2	5.2	69.6
<i>Tampico</i>	68.2	40.8	40.2	80.1	42.2	47.3	83.6	44.5	46.8
<i>Tlaxcala</i>									
<i>Tlaxcala</i>	4.6	3.4	25.4	6	3.4	43.3	6.6	4.4	33.4
<i>Veracruz</i>									
<i>Coatzacoalcos</i>	31.5	17.4	44.8	26.9	14.2	47.1	27.1	13.8	49.1
<i>Xalapa Enriquez</i>	33	16.6	49.7	ND	ND	ND	33	27.8	15.6
<i>Veracruz</i>	ND	ND	ND	110.5	13.8	87.6	83.7	66.5	20.6
<i>Zacatecas</i>									
<i>Fresnillo</i>	9.5	5.4	42.9	9.6	2.2	76.7	9.6	1.4	85.3
<i>Zacatecas</i>	24.6	12.5	49.3	23.3	12.9	44.6	23.5	13.2	43.9

NOTA: Se presentan datos sólo de las entidades de las que se dispone información.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

FUENTE: CNA. Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 1995, 1997 y 1998.

Las medidas necesarias para reducir el nivel de agua extraída y no contabilizada son principalmente: la detección y regularización de tomas clandestinas así como un trabajo más exhaustivo en la detección de fugas. En tanto no se logren implantar estas medidas de una manera más eficiente, todos los esfuerzos por abastecer del vital líquido a la población serán insuficientes.

La SEMARNAT, por medio de la Comisión Nacional del Agua (CNA), se ha encargado de impulsar la construcción y mejoramiento de infraestructura para suministrar los servicios de agua potable, alcantarillado sanitario y saneamiento, tanto en zonas urbanas como rurales. Para mantener los niveles de cobertura alcanzados en las zonas urbanas y disminuir los rezagos en las zonas rurales, se desarrollan las siguientes estrategias:

En las zonas rurales se otorgan subsidios por medio de las tres instancias de gobierno para la terminación o construcción de obras de agua y saneamiento, y se promueve la participación de la población en la operación y mantenimiento de los sistemas de agua y saneamiento para contribuir a asegurar su duración. Se considera que deberán mantenerse estos subsidios incluso en el largo plazo.

En las localidades con población entre 10 y 499 habitantes se instalan hidrantes públicos, en tanto que en aquellas con población entre 500 y 2,500 habitantes el servicio se proporciona a través de tomas domiciliarias.

En las ciudades medias (localidades con una población de hasta 50 mil habitantes) existen apoyos financieros que incluyen la mezcla de recursos fiscales federales y locales a fondo perdido, así como créditos de la banca de desarrollo, que complementan los flujos de caja de los organismos operadores. Su autosuficiencia financiera se prevé en el largo plazo.

En las grandes ciudades (localidades con más de 50 mil habitantes) se propicia la autosuficiencia financiera de sus organismos operadores; mientras tanto, en el corto plazo cuentan con apoyos fiscales y crediticios. Como un instrumento para lograr la autosuficiencia se estimula la participación privada en la administración e inversión en los sistemas de agua potable.

También se realizan inversiones extraordinarias por parte de la federación y se implantan mecanismos que, en paralelo, permiten incrementar la eficiencia en el suministro. Los programas realizados han permitido aumentar de manera sostenida la cobertura de los servicios de agua potable y alcantarillado, tanto en el ámbito urbano como en el rural, al conjuntar la inversión federal con la de los estados y municipios en programas específicos elaborados de común acuerdo.

De acuerdo con el informe presentado por la SEMARNAT, a partir de 1999, el Programa Agua Potable y Saneamiento en Zonas Rurales ha sido financiado parcialmente (en la contraparte federal) con recursos crediticios derivados del contrato de préstamo celebrado con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a raíz de lo cual adquirió el nombre de "Programa para la sostenibilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en comunidades rurales".

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Una de las características del Programa en esta nueva etapa es la inclusión del componente de Desarrollo Institucional, mediante el que se busca el fortalecimiento de las instancias estatales y municipales responsables de los servicios de agua potable y saneamiento en las zonas rurales, a fin de garantizar que la prestación de los mismos sea permanente y con la calidad requerida.

Otro aspecto distintivo es el fortalecimiento de las actividades de atención social y participación comunitaria, para lo cual se ha incluido una fase de acompañamiento institucional durante la cual se brinda asesoría y vigilancia a las organizaciones comunitarias encargadas de la administración y operación de los sistemas de agua potable y alcantarillado instalados.

Se estima que al cierre de 1999 se logró la construcción 583 sistemas de agua potable (en beneficio de 329,538 habitantes) y la rehabilitación de 345 (en beneficio de 251,859 habitantes). Además, se construyeron 77 sistemas de alcantarillado (en beneficio de 63,468 habitantes) y se rehabilitaron 21 (en beneficio de 21,343). Adicionalmente, se construyeron 2,626 sanitarios rurales (en beneficio de 15,104 habitantes).

Aunque el informe de la SEMARNAT no detalla en ninguno de sus apartados el uso de tecnología de desalinización, es inminente que en los próximos años tendrá que ser utilizada esta opción, dada la degradación del agua dulce superficial y subterránea en gran parte del territorio nacional. Para hacer énfasis en la tendencia que apunta hacia la desalación como una opción a ser considerada, en el año de 1998 la CNA envió a algunos de sus directivos a conocer las diversas plantas desaladoras ubicadas en algunas islas del Mediterráneo y del Atlántico, concluyéndose que dichos proyectos tendrían viabilidad en un futuro, siempre y cuando se lograra incrementar la base recaudatoria, así como el planteamiento de la intervención de la iniciativa privada en la producción de agua potable para uso municipal.

El último aspecto comentado en el informe de la SEMARNAT es el correspondiente a la participación de la iniciativa privada. Para fines prácticos, la iniciativa privada participará en aquellos proyectos que le resulten lucrativos, descartándose aquellos proyectos donde se requiera abastecer a las comunidades con mayor grado de pobreza, es en estos proyectos donde el estado deberá dedicar subsidios suficientes para brindar a dichas comunidades agua suficiente para beber y cocinar.

Para lograr un aprovechamiento adecuado de estos subsidios, se deberá de suministrar a estas poblaciones con agua potable únicamente para propósitos de ingestión y preparación de alimentos, para ello, se puede considerar una dotación de 20 litros/hab/día (lo que costaría menos de 0.20 pesos), la tubería se puede tender con una cierta elevación para detectar tomas clandestinas y fugas con gran facilidad, así como evitar la contaminación del agua por inundaciones. El diámetro de la tubería se deberá de calcular de forma tal que limite de manera natural el flujo del agua para satisfacer exclusivamente la dotación calculada y evitar su uso para otros fines.

El fenómeno de privatización ha brindado respuestas a las preguntas de muchos. En países como Inglaterra, Australia, Chile y Argentina, la privatización ha sido el camino para introducir mecanismos eficientes en la producción y distribución de los servicios del sector público y liberar a los gobiernos de una enorme inversión en infraestructura. En otras naciones como

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Pakistán, Brasil y México, el proceso de privatización ocurre más despacio debido a la dificultad para sortear algunos obstáculos políticos, financieros y legales. Algunas naciones se encuentran desarrollando calendarios complicados de transición. El proceso en el que se mezcla una compleja serie de subsidios, concesiones y obligaciones contractuales, demandarán un proceso de privatización que muestre una labor considerable de planeación por parte de los organismos gubernamentales así como del sector privado.

En naciones como México el programa gubernamental de subsidios es superado por una producción ineficiente y una distribución desigual. En el ámbito global, las tendencias de privatización han sido reforzadas por la atracción financiera de vender los bienes de infraestructura, creando capital para servicios de salud y agricultura, entre otros programas sociales. El impacto anticipado en los precios por la privatización regularmente es suavizado por las mejoras en la eficiencia que acompañan a los servicios.

El crecimiento en la población y los desarrollos regionales, especialmente en las naciones en vías de desarrollo, han generado un incremento en las demandas de infraestructura. Los recursos capitales del sector público frecuentemente son insuficientes para lograr maximizar el potencial de desarrollo. La privatización ofrece una forma de crear capital y atraer inversión exterior para lograr las expansiones del sistema.

Los gobiernos deberán examinar cuidadosamente los aspectos económicos del abastecimiento de infraestructura y la habilidad de lograr una expansión, sin impactar adversamente en la deuda pública o en las reservas. Se ha demostrado que la generación de electricidad es un recurso factible de privatizar y en Asia, la producción de agua también ha resultado atractiva para los inversionistas.

Hasta ahora, nuestro país no ha tenido la necesidad de recurrir a la construcción de plantas desalinizadoras a gran escala, para abastecer a sus comunidades, es precisamente ahora cuando se deberá aprovechar la ventana de tiempo de planificación y toma de decisiones en cuanto al uso de esta tecnología.

Considerando lo anterior, el Gobierno del Estado de Sonora a mediados de 1999, presentó el proyecto de una planta desaladora que garantizaría el abasto de agua para la ciudad de Hermosillo hasta el año 2020. El proyecto originalmente contemplaba extraer agua salobre de los mantos subterráneos, sin embargo, debido a la presión de los agricultores de la zona, quienes en septiembre del año 2000 argumentaron que esto afectaría a su vez la capacidad de extraer agua para la agricultura se optó por desalar agua directa del mar. La obligación contractual de quien resulte ganador en la licitación, será la de brindar el servicio durante 20 años, el precio que se ha considerado para el usuario final, se ubica en los 6 pesos y se irá incrementando de acuerdo al índice inflacionario, sin embargo, representantes de la Unión de Usuarios indican que dicho precio podría llegar a los 10 pesos para compensar las pérdidas en la captación y facturación.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

ANÁLISIS FINANCIERO DE PLANTAS DE DOBLE PROPÓSITO

Los modelos térmicos integrales son usados para determinar las tasas netas de consumo de calor, así como el consumo de energía para la desalinización en las plantas de doble propósito (energía/desalinización) basadas en turbinas de vapor. Los resultados son utilizados para determinar las tasas de retorno y los costos de plantas destiladoras con evaporación en etapas múltiples (MSF), destilación por efectos múltiples a bajas temperaturas (MED) y ósmosis inversa (RO) como las opciones analizadas.

El análisis financiero brindará las herramientas necesarias para considerar los factores más importantes que intervienen en el financiamiento de una planta de doble propósito. Las condiciones extremas, que son el costo de la unidad de energía si todos los costos son cargados en dicha unidad, o bien el costo de la unidad de agua desalada si todos los costos son cargados a cada unidad de agua, permitirán generar las condiciones de frontera para el planteamiento de tres funciones (una por cada tecnología) que tendrán como variables el costo del energético y el costo del agua. Estas funciones, al ser procesadas arrojarán un rango donde las tasas internas de retorno serán muy atractivas, de ahí se obtendrán los valores en los costos de producción que permitirán una alta rentabilidad del proyecto.

El presente análisis económico fue realizado por I. Kamal de Fluor Daniel, Inc., en el año de 1997. El análisis abarca las tecnologías MSF, MED y RO. Las corridas financieras arrojan tasas de retorno muy atractivas para el rango de costo de 0.85 a 1.11 dólares. El análisis se basa en un modelo que trata a la planta de doble propósito como un proyecto integral que vende tanto agua potable como electricidad. La tasa de retorno de una planta de doble propósito puede ser calculada basándose en precios obtenidos de agua y electricidad. A continuación se presentan tablas comparativas entre cada una de las tecnologías de desalinización trabajando conjuntamente en una planta termoeléctrica, para dicho análisis económico el capital, operación y mantenimiento, costos de los químicos fueron considerados de acuerdo a la información de los proveedores y algunas estimaciones basadas en la experiencia. La precisión de los costos se estima de un -5 a un 20%. No se consideran aranceles, ni impuestos de importación, así como se incluyen los bienes de capital. Se asume un 30% de equilibrio financiero con una tasa de interés del 9% y un término de 15 años para el pago. Se considera también un interés durante la construcción de un 8%. El precio del gas natural se considera de \$1.62 por cada millón de BTU's. El modelo económico tiene una estructura sofisticada basada en el tiempo de operación, que no será aplicable para todas las situaciones. Las conclusiones se basan en el costo promedio anual de la energía que es una de las principales variables de entrada del modelo.

Los resultados de la tasa interna de retorno, basados en los precios de venta de 4 centavos de dólar por kWh para la energía, así como 0.79 dólares por cada metro cúbico, se muestran en Cuadro 5. 6, Cuadro 5. 7, Cuadro 5. 8 y Cuadro 5. 9. Dichos cuadros también muestran el costo anual promedio expresado en dólares de 1997. Se asume que el periodo de operación de la planta es de 20 años.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 6

<i>Resumen del Análisis Económico para una planta dual MSF con capacidad de 302,800 m³/día</i>	
<p>PARÁMETROS DE ECONÓMICOS Y DE OPERACIÓN</p> <p>COSTOS DE CAPITAL (miles)</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta termoeléctrica \$242,900</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta desalinizadora \$448,000</p> <p style="padding-left: 80px;">Total contratado \$690,000</p> <p>RESUMEN DE LA INVERSIÓN DE CAPITAL</p> <p style="padding-left: 80px;">Contrato \$690,000</p> <p style="padding-left: 40px;">Construcción, inst. y otros costos misceláneos \$151,677</p> <p style="padding-left: 80px;">Capital total como erogación \$842,577</p> <p style="padding-left: 40px;">Fondo de equilibrio financiero \$252,773</p> <p style="padding-left: 80px;">Deuda permanente \$589,804</p> <p>COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos variables en planta generadora \$/MWh \$1.72</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos fijos en planta generadora \$/Kw-Año \$8.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos de planta desaladora \$/m³ \$0.18</p> <p>PARÁMETROS DE FINANCIAMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de préstamo anualizada 9.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Plazo en años (máx. 20) 15.0</p> <p style="padding-left: 40px;">Préstamo para construcción 8.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de reinversión de efectivo 7.80%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera permanente 30.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera construcción 0.0%</p> <p style="padding-left: 80px;">Valor residual 0.00%</p> <p>RENDIMIENTO PROMEDIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Potencia neta generada (MW) 333.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Combustible (mill. de BTUs por hora) 3966.20</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa neta de consumo (BTUs por KWH) 11,866</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción de la desaladora (m³/h) 12,112</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del gas natural (\$/mill. de BTU) 1.62</p>	<p>PRODUCCIÓN ANUAL DE LA PLANTA</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad media de la termoeléctrica 91.90%</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad de la desalinizadora 90.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción total anual de energía (MWh) 2,146,743</p> <p style="padding-left: 80px;">Producción total de agua (m³) 91,414,904</p> <p>PRECIOS DE VENTA DEL PRODUCTO (dólares)</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio de la energía (c/kWh) 4.00</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del agua, \$/m³ \$0.79</p> <p>CALENDARIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Inicio de operaciones 2001</p> <p style="padding-left: 40px;">Año de cálculo de costos 1997</p> <p style="padding-left: 80px;">Años de operación 20</p> <p>RENDIMIENTO CON DEGRADACIÓN</p> <p style="padding-left: 40px;">Degradación (%) 3.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción con degradación (MW) 304.93</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo de energía de la desaladora (MW) 22.92</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de degradación de calor (%) 1.5</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa anual de calor con degradación (BTU/kWh) 14,309</p> <p>CONSUMO DE COMBUSTIBLE ANUAL</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo total anual (mill. de BTU's) 35,472,025</p> <p>RESUMEN DE RESULTADOS</p> <p style="padding-left: 40px;">Cobertura de la deuda en promedio 1.74</p> <p style="padding-left: 80px;">Mínimo de cobertura de la deuda 1.29</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos promedio anualizados para un préstamo</p> <p style="padding-left: 80px;">a 20 años (en miles de dólares de 1997) 172,767</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo de la energía si todos los costos</p> <p style="padding-left: 80px;">son cargados a la energía (c/kWh) 8.05</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo del agua si todos los costos</p> <p style="padding-left: 80px;">Son cargados al agua (\$/m³) 1.89</p>

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 7

<i>Resumen del Análisis Económico para una planta dual MED con capacidad de 302,800 m³/día</i>	
<p>PARÁMETROS DE ECONÓMICOS Y DE OPERACIÓN</p> <p>COSTOS DE CAPITAL (miles)</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta termoelectrica \$252,800</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta desalinizadora \$433,600</p> <p style="padding-left: 80px;">Total contratado \$686,400</p> <p>RESUMEN DE LA INVERSIÓN DE CAPITAL</p> <p style="padding-left: 80px;">Contrato \$686,400</p> <p style="padding-left: 40px;">Construcción, inst. y otros costos misceláneos \$151,110</p> <p style="padding-left: 80px;">Capital total como erogación \$837,510</p> <p style="padding-left: 40px;">Fondo de equilibrio financiero \$251,253</p> <p style="padding-left: 80px;">Deuda permanente \$586,257</p> <p>COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos variables en planta generadora \$/MWh \$1.72</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos fijos en planta generadora \$/Kw-Año \$8.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos de planta desaladora \$/m³ \$0.50</p> <p>PARÁMETROS DE FINANCIAMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de préstamo anualizada 9.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Plazo en años (máx. 20) 15.0</p> <p style="padding-left: 40px;">Préstamo para construcción 8.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de reinversión de efectivo 7.80%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera permanente 30.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera construcción 0.0%</p> <p style="padding-left: 80px;">Valor residual 0.00%</p> <p>RENDIMIENTO PROMEDIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Potencia neta generada (MW) 333.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Combustible (mill. de BTUs por hora) 3966.20</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa neta de consumo (BTUs por KWH) 11,866</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción de la desaladora (m³/h) 12,112</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del gas natural (\$/mill. de BTU) 1.62</p>	<p>PRODUCCIÓN ANUAL DE LA PLANTA</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad media de la termoelectrica 91.90%</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad de la desalinizadora 90.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción total anual de energía (MWh) 2,483,965</p> <p style="padding-left: 80px;">Producción total de agua (m³) 91,414,904</p> <p>PRECIOS DE VENTA DEL PRODUCTO (dólares)</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio de la energía (c/kWh) 4.00</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del agua, \$/m³ \$0.79</p> <p>CALENDARIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Inicio de operaciones 2001</p> <p style="padding-left: 40px;">Año de cálculo de costos 1997</p> <p style="padding-left: 80px;">Años de operación 20</p> <p>RENDIMIENTO CON DEGRADACIÓN</p> <p style="padding-left: 40px;">Degradación (%) 3.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción con degradación (MW) 323.68</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo de energía de la desaladora (MW) 10.17</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de degradación de calor (%) 1.5</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa anual de calor con degradación (BTU/kWh) 13,869</p> <p>CONSUMO DE COMBUSTIBLE ANUAL</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo total anual (mill. de BTU's) 35,472,025</p> <p>RESUMEN DE RESULTADOS</p> <p style="padding-left: 40px;">Cobertura de la deuda en promedio 2.03</p> <p style="padding-left: 80px;">Mínimo de cobertura de la deuda 1.53</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos promedio anualizados para un préstamo a 20 años (en miles de dólares de 1997) 168,096</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo de la energía si todos los costos son cargados a la energía (c/kWh) 6.77</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo del agua si todos los costos son cargados al agua (\$/m³) 1.84</p>

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 8

<i>Resumen del Análisis Económico para una planta dual RO con capacidad de 302,800 m³/día</i>	
<p>PARÁMETROS DE ECONÓMICOS Y DE OPERACIÓN</p> <p>COSTOS DE CAPITAL (miles)</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta termoeléctrica \$296,800</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta desalinizadora \$329,800</p> <p style="padding-left: 80px;">Total contratado \$626,600</p> <p>RESUMEN DE LA INVERSIÓN DE CAPITAL</p> <p style="padding-left: 80px;">Contrato \$626,600</p> <p style="padding-left: 40px;">Construcción, inst. y otros costos misceláneos \$142,870</p> <p style="padding-left: 80px;">Capital total como erogación \$769,470</p> <p style="padding-left: 40px;">Fondo de equilibrio financiero \$230,841</p> <p style="padding-left: 80px;">Deuda permanente \$538,629</p> <p>COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos variables en planta generadora \$/MWh \$1.72</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos fijos en planta generadora \$/Kw-Año \$8.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos de planta desaladora \$/m³ \$1.14</p> <p>PARÁMETROS DE FINANCIAMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de préstamo anualizada 9.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Plazo en años (máx. 20) 15.0</p> <p style="padding-left: 40px;">Préstamo para construcción 8.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de reinversión de efectivo 7.80%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera permanente 30.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera construcción 0.0%</p> <p style="padding-left: 80px;">Valor residual 0.00%</p> <p>RENDIMIENTO PROMEDIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Potencia neta generada (MW) 424.06</p> <p style="padding-left: 40px;">Combustible (mill. de BTUs por hora) 3966.20</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa neta de consumo (BTUs por KWH) 9,353</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción de la desaladora (m³/h) 12,112</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del gas natural (\$/mill. de BTU) 1.62</p>	<p>PRODUCCIÓN ANUAL DE LA PLANTA</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad media de la termoeléctrica 91.90%</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad de la desalinizadora 90.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción total anual de energía (MWh) 2,981,756</p> <p style="padding-left: 80px;">Producción total de agua (m³) 91,414,904</p> <p>PRECIOS DE VENTA DEL PRODUCTO (dólares)</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio de la energía (c/kWh) 4.00</p> <p style="padding-left: 80px;">Precio del agua, \$/m³ \$0.79</p> <p>CALENDARIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Inicio de operaciones 2001</p> <p style="padding-left: 40px;">Año de cálculo de costos 1997</p> <p style="padding-left: 80px;">Años de operación 20</p> <p>RENDIMIENTO CON DEGRADACIÓN</p> <p style="padding-left: 40px;">Degradación (%) 3.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción con degradación (MW) 411.34</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo de energía de la desaladora (MW) 25.00</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de degradación de calor (%) 1.5</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa anual de calor con degradación (BTU/kWh) 10,608</p> <p>CONSUMO DE COMBUSTIBLE ANUAL</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo total anual (mill. de BTU's) 35,472,025</p> <p>RESUMEN DE RESULTADOS</p> <p style="padding-left: 40px;">Cobertura de la deuda en promedio 2.28</p> <p style="padding-left: 80px;">Mínimo de cobertura de la deuda 1.72</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos promedio anualizados para un préstamo</p> <p style="padding-left: 80px;">a 20 años (en miles de dólares de 1997) 178,265</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo de la energía si todos los costos</p> <p style="padding-left: 80px;">son cargados a la energía (c/kWh) 5.98</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo del agua si todos los costos</p> <p style="padding-left: 80px;">Son cargados al agua (\$/m³) 1.95</p>

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Cuadro 5. 9

<i>Resumen del Análisis Económico para una planta termoeléctrica de vapor</i>	
<p>PARÁMETROS DE ECONÓMICOS Y DE OPERACIÓN</p> <p>COSTOS DE CAPITAL (miles)</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta termoeléctrica \$296,800</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato de planta desalinizadora \$0</p> <p style="padding-left: 40px;">Total contratado \$296,800</p> <p>RESUMEN DE LA INVERSIÓN DE CAPITAL</p> <p style="padding-left: 40px;">Contrato \$296,800</p> <p style="padding-left: 40px;">Construcción, inst. y otros costos misceláneos \$95,324</p> <p style="padding-left: 40px;">Capital total como erogación \$392,124</p> <p style="padding-left: 40px;">Fondo de equilibrio financiero \$117,637</p> <p style="padding-left: 40px;">Deuda permanente \$274,487</p> <p>COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos variables en planta generadora \$/MWh \$1.72</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos fijos en planta generadora \$/Kw-Año \$8.69</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos de planta desaladora \$/m³ \$0.00</p> <p>PARÁMETROS DE FINANCIAMIENTO</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de préstamo anualizada 9.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Plazo en años (máx. 20) 15.0</p> <p style="padding-left: 40px;">Préstamo para construcción 8.00%</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de reinversión de efectivo 7.80%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera permanente 30.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Porcentaje de equidad financiera construcción 0.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Valor residual 0.00%</p> <p>RENDIMIENTO PROMEDIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Potencia neta generada (MW) 424.06</p> <p style="padding-left: 40px;">Combustible (mill. de BTUs por hora) 3966.20</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa neta de consumo (BTUs por KWH) 9,353</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción de la desaladora (m³/h) 0</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del gas natural (\$/mill. de BTU) 1.62</p>	<p>PRODUCCIÓN ANUAL DE LA PLANTA</p> <p style="padding-left: 40px;">Factor de capacidad media de la termoeléctrica 91.90%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción total anual de energía (MWh) --</p> <p>PRECIOS DE VENTA DEL PRODUCTO (dólares)</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio de la energía (c/kWh) --</p> <p style="padding-left: 40px;">Precio del agua, \$/m³ --</p> <p>CALENDARIO</p> <p style="padding-left: 40px;">Inicio de operaciones 2001</p> <p style="padding-left: 40px;">Año de cálculo de costos 1997</p> <p style="padding-left: 40px;">Años de operación 20</p> <p>RENDIMIENTO CON DEGRADACIÓN</p> <p style="padding-left: 40px;">Degradación (%) 3.0%</p> <p style="padding-left: 40px;">Producción con degradación (MW) 411.34</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo de energía de la desaladora (MW) -----</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa de degradación de calor (%) 1.5</p> <p style="padding-left: 40px;">Tasa anual de calor con degradación (BTU/kWh) 10,608</p> <p>CONSUMO DE COMBUSTIBLE ANUAL</p> <p style="padding-left: 40px;">Consumo total anual (mill. de BTU's) 35,472,025</p> <p>RESUMEN DE RESULTADOS</p> <p style="padding-left: 40px;">Cobertura de la deuda en promedio 2.99</p> <p style="padding-left: 40px;">Mínimo de cobertura de la deuda 2.30</p> <p style="padding-left: 40px;">Costos promedio anualizados para un préstamo a 20 años (en miles de dólares de 1997) 111,119</p> <p style="padding-left: 40px;">Costo de la energía si todos los costos son cargados a la energía (c/kWh) 3.32</p>

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

Los análisis del Cuadro 5. 6, Cuadro 5. 7, Cuadro 5. 8 y Cuadro 5. 9 se han utilizado para determinar los costos de la energía y del agua para los tres métodos más comunes de desalinización. De la información anterior se pudieron generar las siguientes ecuaciones donde los precios del agua (W_c) se encuentran en función de costo de la energía (P_c):

$$\text{MSF:} \quad W_c = (8.05 - P_c) / 4.2615$$

$$\text{MED:} \quad W_c = (6.777 - P_c) / 3.6817$$

$$\text{RO:} \quad W_c = (5.98 - P_c) / 3.0670$$

Los resultados se muestran de manera gráfica en la Figura 5. 8 Costos de producción en plantas de propósito doble.

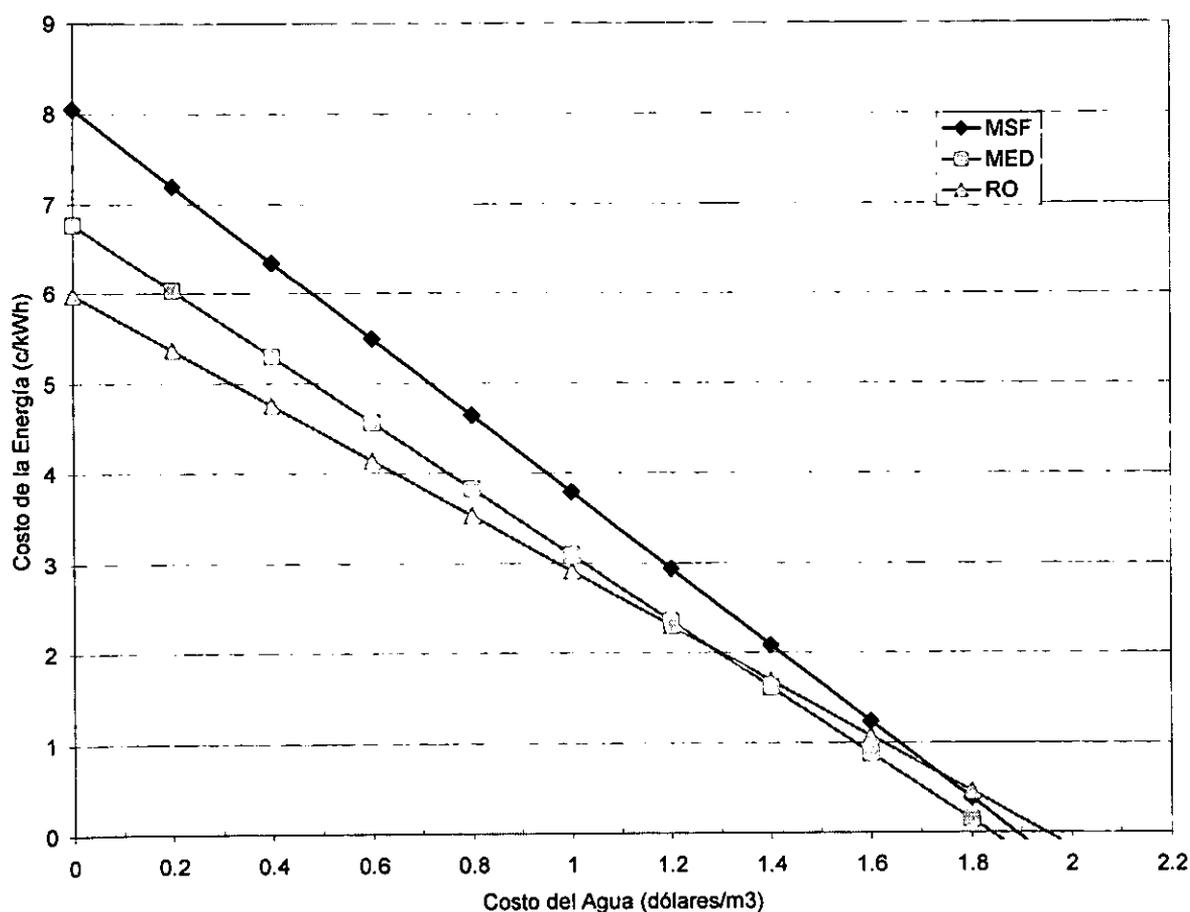


Figura 5. 8 Costos de producción en plantas de propósito doble

Basándose en los costos de producción de 3.32 centavos por kWh evaluados para la opción de una termoeléctrica simple, el costo del agua procesada obtenido es de:

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CAPÍTULO V. FINANCIAMIENTO

- 1.11 dólares/m³ para la planta MSF
- 0.94 dólares/m³ para la planta MED
- 0.87 dólares/m³ para la planta RO

El ejemplo anterior es un caso teórico por lo que los costos pueden variar de proyecto a proyecto dependiendo de la elección del ciclo básico de vapor, la relación entre energía y agua, el costo del combustible, el factor de capacidad de la planta, las condiciones financieras y otros parámetros. Sin embargo, el estudio arroja que existen tasas de retorno muy atractivas en los costos del agua en el rango de 0.85 a 1.11 dólares, que resultan accesibles con la tecnología actual para aquellas plantas de doble propósito.

Es importante destacar que la opción que menor costo representa, es la que utiliza el proceso de ósmosis inversa, lo que confirma que esta tecnología se perfila como la más económica en el futuro inmediato.

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES.

Los diversos métodos de desalinización se ajustan para las distintas necesidades, por ejemplo, la destilación y la ósmosis inversa se utilizan para procesar el agua marina, en tanto que la electrodiálisis y ósmosis inversa se suelen utilizar para desalar agua salobre. La tecnología madura de las plantas de destilación en etapas múltiples (MSF) permite desarrollos menos revolucionarios y su perfeccionamiento está confinado a la tecnología de materiales. Las plantas de efectos múltiples (MED) están generando un gran impacto debido al incremento que ha sufrido su capacidad. Las tecnologías de membrana son las que han registrado probablemente el mayor cambio a lo largo de la década pasada, al conseguir menores presiones para operar, controlar los tamaños de los poros así como el incremento en su confiabilidad. Las combinaciones de tecnologías de destilación y membranas ofrecen la mejor alternativa en términos de calidad y bajo costo. De cualquier forma, se deberá de hacer un estudio a conciencia que incluya las características del agua que será tratada, así como los estudios de factibilidad técnica y económica. El proceso a elegir deberá ser el más razonable económicamente, sin embargo, también deberá ser el más funcional, el que mayor vida útil tenga, así como el que obtenga agua de mejor calidad.

El cúmulo de experiencia adquirida a lo largo de la historia de las desalinizadoras ha permitido hacer más eficientes los procesos, lo que se traduce en un costo más accesible para las naciones en vías de desarrollo como México. En los últimos diez años los costos han sufrido un decremento notable, pues de 1.40 dólares que costaba el metro cúbico en los noventa, ahora cuesta 0.80 dólares. Las tendencias actuales arrojan que los métodos que se perfilarán como los óptimos en su relación costo-beneficio son los cuatro basados en membranas: la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración y la ósmosis inversa.

Producir agua en grandes cantidades dentro de un ambiente regulado es una nueva responsabilidad para la comunidad científica y representa una oportunidad para la industria para demostrar cuánto puede ser logrado con una aplicación juiciosa de la tecnología. Las plantas que integren procesos de destilación y de membrana deberán de ser la solución para lograr confiabilidad, flexibilidad y operación a bajo costo. Compartir el costo del combustible en una planta dual permite abatir los costos de producción de agua dulce, sin embargo surge el cuestionamiento de considerar que toda la demanda de energía fuera requerida por la desalinizadora, en este caso los costos ya no serían tan competitivos. El quemar combustible cuyo contenido de energía es elevado para calentar agua marina sin producir ningún tipo de energía, no es lo que se podría considerar como una inteligente aplicación de la Segunda Ley de la Termodinámica. La integración y operación conjunta entre procesos térmicos y osmóticos lejos de ser una competencia o confrontación es la respuesta para optimizar la producción de energía y agua.

Algunos factores clave que desempeñarán un papel fundamental en el mercado del agua potable en un futuro cercano serán: 1) Las regulaciones que exigirán una reducción en la turbiedad y agentes patógenos, 2) El crecimiento demográfico, 3) Las preferencias del usuario hacia una

LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN MÉXICO

CONCLUSIONES.

tecnología que brinde una barrera a los agentes patógenos así como una utilización menor de sustancias químicas. Estos factores harán de los procesos de desalinización los más adecuados para la obtención de agua para consumo doméstico.

Es un hecho interesante el que las naciones industrializadas aún contando con cierta riqueza de agua dulce, sigan incrementando su potencial de desalinizador. Es también interesante tener en cuenta que las técnicas de desalinización están incrementando su uso en el sector de abastecimiento de agua, pero no necesariamente en el campo del abastecimiento de agua potable, también se comienza a considerar como una alternativa para el riego de sembradíos, jardines y uso industrial.

Aunque algunos organismos como Petróleos Mexicanos ya cuentan con desalinizadoras, es ahora cuando se comienzan a gestar los primeros proyectos municipales de desalinización; la ciudad de Hermosillo está planeando una planta de ósmosis inversa con una capacidad de 270,000 metros cúbicos diarios, mientras que en Cabo San Lucas se ha empezado a trabajar en una planta con una capacidad de 50,000 metros cúbicos diarios. En marzo del 2001 se celebró una conferencia en Tijuana donde se plantearon las necesidades, aspectos y soluciones para el abastecimiento de agua en ambos lados de la frontera, incluyendo las ciudades de Mexicali, Ensenada, Tijuana y Tecate, donde se está considerando la explotación de agua salobre, agua marina y aguas residuales.

El camino por andar aún es muy largo, nuestra nación aún tiene severos rezagos en materia de abastecimiento de agua. Irónicamente en las regiones donde se tiene la mayor precipitación pluvial como son los Altos de Chiapas y Tabasco, es donde se tiene el mayor porcentaje de población carente del suministro del vital líquido, para estas regiones lógicamente no se recomienda el uso de tecnologías de desalinización, en todo caso será necesario realizar una reestructuración de todo el sistema de recaudación y subsidios para lograr cubrir las demandas crecientes. Para aquellas comunidades sumidas en la extrema pobreza será absurdo considerar la intervención de la iniciativa privada en tanto no exista un subsidio por parte del gobierno en sus diversos niveles. En el caso de comunidades y regiones donde los recursos son más abundantes, deberá considerarse una política intensiva de recaudación así como un ajuste en las tarifas, ya que la aportación per cápita anual para suministro de agua potable llega escasamente a los 55 pesos, lo que resulta insuficiente y demuestra que existe un sobresubsidio innecesario en la mayoría de los casos y un subsidio insuficiente para aquellas comunidades de escasos recursos.

Nuestro país cuenta con una extensión litoral de más de 11,000 kilómetros; toda esa extensión permanece subutilizada porque insistentemente hemos permanecido inmersos en el centralismo heredado de épocas pasadas. Ha llegado el momento de hacer de México una nación de cara al mar.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, *Programa Hidráulico 1995-2000*, publicado por el propio organismo, México, D. F. 2000.
2. Comisión Nacional del Agua, *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento al 31 de diciembre de 1998*, publicado por el propio organismo, Novena Edición, México, D. F., 1998.
3. Instituto Nacional de Estadística, Geografía en Informática, *Anuario de Estadísticas por Entidad Federativa, Edición 2000*, publicado por el propio organismo, México, D. F., 2000.
4. Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, *Programa de Trabajo para el Año 2000*, publicado por el propio organismo, México, D. F. 2000.
5. O. K. Buros, *The ABC's of Desalting*, Segunda Edición, publicado por la International Desalination Association, Topsfield Massachusetts, Estados Unidos, 2000
6. D. Barnes, P. J. Bliss, B. W. Guld & H. R. Vallentine, *Water and Wastewater*, The Pitman Press, 1981
7. Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Eficiencia Energética y Desalación de Agua*, Editorial Miner, Madrid, España, 1995.
8. I. Monguilot, *El Mar y sus Recursos*, Editorial Cincel, S. A., Madrid, España, 1983.
9. El Imparcial, Diario Independiente de Sonora, Artículo "Desalarán agua directa del mar", 28 de septiembre del 2000.
10. T. Pankratz, *Desalination: A Drought-proof Water Solution*, presentado en el World Water Forum, La Haya, Holanda, marzo del 2000.
11. W. T., Andrews, *A Novel Method of Distributing Water in Undeveloped Areas- Providing Rationed Water for Drinking and Cooking*, presentado en el World Water Forum, La Haya, Holanda, marzo del 2000.
12. J. Tonnner, *The Tough Question, What does desalinated water cost?*, presentado en el World Water Forum, La Haya, Holanda, marzo del 2000.
13. T. Pankratz, *Large Scale Desalination Plants - A Drought-proof Water Supply*, Revista IDA News, Vol. 9, Marzo-Abril 2000, Topsfield Massachusetts, Estados Unidos.
14. R. Truby, *Membrane Separation Markets Expand in North America*, Revista IDA News, Vol. 10, Enero-Febrero 2001, Topsfield Massachusetts, Estados Unidos.
15. C. Sommariva, *Viewpoint*, Revista IDA News, Vol. 10, Marzo-Abril 2001, Topsfield Massachusetts, Estados Unidos.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

16. E. El-Ella, H. A. Ibrahim, A. H. Hussaini, *Goelectrical and Hydrogeological Studieon the Sediments of the Main Trunck, Wadi El-Mathula Basin, Eastern Desert, Egypt*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
17. I. Alatiqi, S. Bingulac, *Steady State Analysis of Multiple Effect Evaporation Desalination Process-Hisham El-Dessouky*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
18. F. Pepp, D. Lee, A. Ophir & Weinberg, *The Vertical MWD MED (Multi-Effect Distillation) Process*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
19. K. Genthner, D. Al-Gobaisi, K. Wangnick, *The Novel 100,000 m³/d (22 MIGPD), "Jumbo" MSF Desalter- A realistic Technical and Commercial Approach or...*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
20. A. Ophir, J. Weinberg, *MED (Multi Effect Distillation) Desalination Plants – A Solution for the Water Problem in The Middle East*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
21. M. Wilf, K. Klinko, *Effect of New Pretreatment Methods and Improved Membrane Performance on Design of RO Seawater Systems*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
22. J. Rueda, J. Zozaya, *Desalination Plant of San Antonio de Portmany (IBIZA), Advantages of a Flexible Design*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
23. K. Wangnick, B. Kamaludin, J. Talavera, *Reverse Osmosis Seawater Desalination Systems in Cogeneration Plants for Additional Production of Drinking Water*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
24. H. Scholl, *New Concept to Increase Overall Efficiency in Reverse Osmosis Plants*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
25. W. Andrews, S. Shumway, B. Rusell, *Design of a 10,000 cu-m/d Seawater Reverse Osmosis Plant on New Providence Island, The Bahamas*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
26. T. Missimer, *Technical Evaluation of Ranney Collector for Raw Water Supply to Seawater Reverse Osmosis Treatment Facilities*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
27. S. Duranceau, J. Foster, R. Gonzalez, I. Watson, *Innovative Application of Off-the-Shelf Tecnology Pays Dividends for a Florida Utility*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

28. J. Lineiro, E. Kundig, *Advancements & Improvements on Power Recovery Turbines*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
29. J. Ohnishi, K. Nita, M. Sekino, *Development of High Permeate Flow Rate and High Pressure Resistance RO Module for Seawater Desalination*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
30. V. Linkov, V. Belyakov, *Composite Inorganic Membranes for Desalination Reactors*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
31. W. Graham, A. Van Vugt, P. Kalish, *Novel, Low Cost, Reverse Osmosis System for Seawater & Brackish Water Desalination*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
32. A. Khawaji, J. Wie, T. Khan, *Operating Experience of the Royal Commission Acid-dosed MSF Seawater Desalination Plant*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
33. A. Ismail, *Control of Multi-Stage Flash (MSF) Desalination Plants: A Survey*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
34. A. Abudayyeh, R. Hamdam, P. Mukerjee, P. Vijay, *20 Years Operation and Maintenance Experience at Ghubrah Power & Desalination Plant*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
35. M. Fazio, R. Borsani, *Desalination Rehabilitation Works and Economical/Management Decision to Extend Plant Life*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
36. J. Sánchez, M. Izquierdo, *The Revamping of Old Desalination Plants: Some Cases in Spain*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
37. S. Adbulsalam, A. Ahsan, *Modification Done/Proposed for Improvement of Productivity of Quality at SWCC, Al-Jubail MSF Plant-Mohd*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
38. J. Sadhwani, *Operation Costs, Las Palmas III Desalinating Plant*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
39. M. Farooque, A. Al-Amoudi, A. Jamaludding & A. Hassan, *Performance Restoration, Autopsy and Analysis of Five Different Commercial SWRO Membranes*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
40. H. Iwahori, T. Sakka & Y. Kamiyama, *Introduction of Recent Advanced RO Membranes & Their Typical Examples... Ultra-Low-Pressure RO for Brackish Water Desalination*,

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

- presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
41. J. Veza, J. Sadhwani, *Cleaning Methods for Reverse Osmosis Membranes*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 42. N. Raveendran, *Operation and Maintenance Experience of R.O. Plants in the Middle East and Africa*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 43. S. Adham, R. Trusell, P. Gagliardo, K. Weinberg, I. Najm & T. Richardson, *Development of an Innovative Advanced Treatment System for Indirect Potable Reuse*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 44. A. Echeverría, *San Lorenzo Valley Desalination Plant in Tenerife*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 45. M. Jafar, M Abdel-Jawad, *Design and Evaluation of a Fully Automated Reverse Osmosis Plant*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 46. D. Prats, M. Chillón, A. Gómez, *The Start of the Brackish Water Reverse Osmosis Plant at Alicante University: Operation and Control*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 47. A. Tuthill, B. Todd, *Experience with Copper Alloy Tubing, Waterboxes and Piping in MSF Desalination Plants*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 48. E. Alfonsson, A. Berquist, J. Olsson, K. Minnich & J. Tonner, *Solid Stainless Steel for MSF Once Through Plants*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 49. A. Al-Arifi, M. Dahshan, M. Hazza, *A Review on the Effect of Molybdenum Additions on the Corrosion Resistance of Steel Alloys*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 50. J. Juliel, *Factors Affecting Scale Formation in Sea Water Environments; Experimental Approach*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 51. K. Habib, F. Al-Sabti, *Monitoring & Measuring Electrochemical Behaviors of Engineering Alloys by Optical Interferometry*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
 52. R. Wright, T. Missimer, *Alternative Intake Systems for Seawater Membrane Water Treatment Plants*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

53. S. Yiantsios, J. Karabelas, *An Experimental Study of Membrane Fouling by Colloidal Particles: Effect of Colloid Stability*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
54. H. Winters, *A New Method to Predict and Control of Biofouling and Organic Fouling (Composite Fouling) of Reverse Osmosis Membranes*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
55. Z. Amjad, P. Nicholas, J. Pugh, J. Zibrida, *A New Antifoulant for Controlling Silica Fouling of Reverse Osmosis Systems*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
56. S. Sadr, P. Beatson, R. Schneider, A. Fane, *Microbiological Aspects of Dual Membranes Processes for Water Reclamation*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
57. E. Darton, *Silica Inhibition in RO Systems in the Canary Islands*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
58. J. Nemeth, P. Robert, W. Zuhl, B. Jordan, G. Galijaard, *Scale Inhibitors: Application, Development and Trends*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
59. M. Gamal Khedr, S. Quadri, *High Temperature Reverse Osmosis and Control of Membrane Fouling*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
60. Y. El-Sayed, *The Thermoconomics of Sea-Water Desalination Systems*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
61. L. Awerbuch, *Power – Desalination and the Importance of Hybrid Idea's*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
62. I. Kamal, *Thermo-economic Modeling of Dual-Purpose Power/Desalination Plants: Steam Cycles*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
63. A. Gregorzewsky, H. Glade & K. Genthner, *Combined Power and Water Production with Thermal Desalination and Gas Turbines: The Range of Practical Combinations* presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
64. J. De Vries, G. Delvigne, R. Thabet, *Relocation of Desalination Plant's Outfall in the U. A. E. in Order to Minimize Environmental Damage*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
65. E. Kundig, I. Calder-Potts, B. Weatherholt, *The Cost of Desalting Water. A Quantitative Comparison of 7 R.O. Plants in Operation all Fitted with Energy Recovery Devices*,

**LA DESALINIZACIÓN, UNA ALTERNATIVA PARA EL ABASTECIMIENTO DE
AGUA EN MÉXICO**

BIBLIOGRAFÍA.

presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.

66. I. Moch. F. Depenbrock, W. Burke, *Project Economics of Dual Purpose Plants Employing Reverse Osmosis Technology*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.
67. J. Quintana, G. Mederos, G. Machado, *Quantitative and Qualitative Costs Analysis in Water Supply Enterprises*, presentado en el IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, España, octubre de 1997.