

68
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROCESOS DE DESALACION DE AGUA
DE MAR:
PRINCIPIOS Y COSTOS DE IMPLANTACION.**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL**

P R E S E N T A :

ENRIQUE RAFAEL GUTIERREZ MORALES



**TRABAJA CON
FALLA LE ORIGEN**

México, D. F.

1991



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 está 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.

C O N T E N I D O

I. ANTECEDENTES

I.1 Generalidades

I.2 Usos y calidad del agua

I.2.1 Uso doméstico

I.2.2 Uso agropecuario

I.2.3 Uso industrial

I.2.4 Agua para acuacultura

I.2.5 Agua para recreación

I.3 La desalación de agua de mar como opción de aprovechamiento

I.4 La desalación de agua de mar en la República Mexicana

II. DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE DESALACION

II.1 Introducción a los procesos de desalación

II.2 Generalidades de los procesos de desalación

II.3 Osmosis inversa

II.3.1 Generalidades

II.3.2 Presión neta de trabajo

II.3.3 La productividad de la ósmosis inversa

II.3.4 Factor de conversión

II.3.5 El factor Beta

II.3.6 Tipos de membranas para ósmosis inversa

II.3.7 Membranas dinámicas

II.3.8 Cantidad y calidad del agua producto

II.3.9 Sistemas paquete de ósmosis inversa

II.4 Destilación

II.4.1 Generalidades de la destilación

II.4.2 Transferencia de calor

II.4.3 Relación de transferencia de calor

II.4.4 Factor de rendimiento

II.4.5 Rango de destilación

II.4.6 Procesos de destilación

II.5 Destilación solar

II.5.1 Principios de la destilación solar

II.5.2 Rendimiento de un sistema de destilación solar

- II.6 Congelamiento
 - II.6.1 Procesos físicos en el congelamiento
- II.7 Electrodiálisis y electrodiálisis inversa
 - II.7.1 Electrodiálisis
 - II.7.2 Generalidades del proceso de electrodiálisis
 - II.7.3 Membranas aniónicas y catiónicas
 - II.7.4 Polarización
 - II.7.5 Requerimientos de energía y fuerza
 - II.7.6 Método de cálculo
 - II.7.7 Electrodiálisis inversa
- II.8 Consideraciones en un sistema de desalación
 - II.8.1 Pretratamiento
 - II.8.2 Sistema de bombeo
 - II.8.3 Unidad de desalación
 - II.8.4 Postratamiento
 - II.8.5 Utilización final del agua producto
 - II.8.6 Disposición del desecho concentrado

III. COSTOS DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE MEDIANTE DESALADORAS

- III.1 Introducción
- III.2 Factores que afectan el costo del agua desalada
 - III.2.1 Tamaño de la planta y equipo
 - III.2.3 Consumo de energía
 - III.2.4 Costo de inversión
 - III.2.5 Costo de agentes químicos
 - III.2.6 Mano de obra
 - III.2.7 Mantenimiento y reparación
 - III.2.8 Disposición de la salmuera de desecho
- III.3 Costos de desalación
 - III.3.1 Costos de desalación para el proceso de ósmosis inversa
 - III.3.2 Costos de desalación para el proceso de destilación
 - III.3.3 Costos de desalación para el proceso de congelamiento
 - III.3.4 Costos de desalación para el proceso de electrodiálisis

IV. EL CASO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL DESARROLLO TURISTICO DE CHEMUYIL, QUINTANA ROO

- IV.1 Antecedentes
- IV.2 Marco físico

- IV.2.1 Localización
- IV.2.2 Hidrografía
- IV.2.3 Clima
- IV.2.4 Clasificación y uso del suelo
- IV.2.5 Flora y fauna

IV.3 Marco socioeconómico

- IV.3.1 Población
- IV.3.2 Servicios públicos
- IV.3.3 Actividades económicas

IV.4 Generalidades del corredor turístico Cancún-Tulum

- IV.4.1 Desarrollo urbano de Chemuyil, Quintana Roo
- IV.4.2 Desalación de agua marina para Chemuyil, Quintana Roo

V. CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

ANEXO A

I. **ANTECEDENTES**

I. ANTECEDENTES

I.1 Generalidades

Desde tiempos inmemorables, el agua ha jugado el papel más importante en la existencia del hombre. Este ha recorrido por siglos grandes distancias en busca de cuerpos de agua para cubrir sus necesidades. La gente dedicada al campo y a la agricultura se estableció en las planicies de los grandes ríos, donde las corrientes de temporada irrigaban la tierra y proveían a ésta de nutrientes para contribuir al crecimiento de plantas.

Sin embargo y desde otro punto de vista, fisiológicamente el agua es de vital importancia; sin una gota para beber la mayoría de los hombres no sobrevivirían más de una semana. Pero más allá de la supervivencia como tal, el agua es una ayuda importantísima en los procesos vitales del cuerpo humano, como en su estabilidad térmica, ya que la sudoración dispersa grandes cantidades de calor del cuerpo. También, como el principal constituyente de la sangre, el agua es el medio por el cual el oxígeno del aire hace su camino a través de las paredes de los alveólos pulmonares, para así combinarse con la hemoglobina y, vía el torrente sanguíneo, llegar a los tejidos celulares.

Como puede verse, no sólo el agua es importante a nivel cuerpo humano, sobreentendiéndose que para éste es vital, sino también es importante para los núcleos de población desde niveles de localidad hasta países. Estos dependen completamente de la disponibilidad del agua para su desarrollo social y económico.

Al total de agua que existe sobre la tierra se le ha definido como hidrósfera. Esta es la envoltura acuosa de la tierra, incluyendo los océanos, mares, lagos, ríos y aguas subterráneas, glaciares polares y de montaña, la humedad del suelo y el vapor de agua que contiene la atmósfera.

No obstante la gran cantidad de agua que existe en nuestro planeta, toda ella se encuentra de muy diversas formas y, aunque todas aprovechables de una u otra forma y en diferentes medidas, sólo una poca de manera económica. Su distribución es de la siguiente manera:

Los mares y océanos abarcan un área de 361 millones de kilómetros cuadrados, o sea, el 70.8% de la superficie terrestre. Como resultado, los continentes abarcan el 29.2%, lo cual es menos de la tercera parte. Sin embargo, desde el punto de vista volumétrico, toda el agua de la hidrósfera abarca una ínfima parte del volumen de la tierra. El Cuadro I.1 muestra la distribución del total del volumen de agua. Como se puede observar en dicho cuadro, el volumen instantáneo de agua en la hidrósfera llega a cerca de 1,400 millones de km³. Al océano mundial le corresponde casi el 94% del total y al agua continental del mundo 88'000,000 km³, o sea el 6%. El agua dulce, que incluye unos 8 millones de km³ de agua subterránea, equivale a unos 32 millones de km³, sólo un poco más del 2% del total de la hidrósfera.

En realidad, el porcentaje de agua dulce que el hombre puede usar abarca sólo el 0.3% de la hidrósfera; en consecuencia, una parte ínfima de ésta desempeña el papel principal en la vida y economías humanas.

Claro está que se pudiera pensar que el agua, como todo, es algo cambiante y que dichos volúmenes no son siempre los mismos en el transcurso del tiempo. Sin embargo los datos presentados en el cuadro anterior han sido estimados de muchas maneras, llegándose a la conclusión que ellos son un promedio bastante acertado.

No se puede decir que no se empleen otras partes de la hidrósfera; por ejemplo, los mares son importantes recursos para la pesca y el transporte. El agua subterránea se ha venido explotando captándose ya sea de norias, pozos profundos, manantiales, etc. El agua pluvial es captada en muchos lugares del mundo para el abastecimiento de agua potable en pequeña escala. El agua marina se usa, aunque en pequeña escala comparada con otras fuentes, con fines técnicos, como en la condensación de vapor en las centrales térmicas de energía eléctrica y sólo de manera reciente a nivel nacional con fines de abastecimiento de agua potable.

Sin embargo, el hecho de que no haya más que una pequeña cantidad de agua dulce y que la población humana, a nivel mundial, esté alcanzando índices de crecimiento tan elevados, así como el vertiginoso agotamiento de las reservas de aguas continentales, no representa amenaza alguna. Lo que cuenta no es tanto la verdadera cantidad de ella, sino lo que se denomina "reserva dinámica", que se define como el agua que participa en el ciclo hidrológico y la que en determinado momento, específicamente en la forma condensada, el hombre aprovecha para captarla y satisfacer sus necesidades. Dicha reserva dinámica se ilustra, junto con el ciclo hidrológico, en la Figura I.1.

Cualquiera que sea el peligro que pueda existir de escasez de agua, proviene más bien del ineficiente uso de los recursos, que de la falta de agua en el mundo.

A nivel nacional, son muchos los puntos del país que actualmente tienen o tendrán conflictos en su abastecimiento de agua. En el Plan Nacional de Desarrollo Urbano se definió un sistema integrado por 93 ciudades donde se considera necesario tomar acciones con carácter prioritario, tanto de impulso como de consolidación y control, debido a que se planea se absorban la mayor parte del crecimiento demográfico. La Figura I.2 muestra los lugares en donde se han identificado dichos conflictos de abastecimiento.

Por otro lado, la escasez de agua o la posibilidad de que ello ocurra, se detecta mediante balances hidráulicos realizados a nivel regional. Estos balances han arrojado resultados que se han traducido en una sectorización de regiones por su disponibilidad de agua. Como lo muestra la Figura I.3, gran parte del territorio mexicano tiene escasez de agua y en otra gran parte no existe este problema, haciendo a un lado si dicha agua presenta o no problemas de calidad.

I.2 Usos y calidad del agua

Ya se ha hablado de la gran problemática que presenta el agua en cuanto a su disponibilidad, pero este no es el único problema, sino también existe el de su calidad.

Dentro de la gama infinita de usos a que está sujeta el agua, el ser humano la emplea con muchos fines. Entre los de carácter doméstico se pueden mencionar los usos potables y culinarios, lavado y baños, limpieza de ventanas, paredes y pisos, calefacción y acondicionamiento de aire, riego de prados y jardines y llenado de piscinas, así como también la infinidad de usos que se le da en el sector industrial y agropecuario.

Todos estos usos y muchos más los podemos clasificar en ocho grupos, a saber:

- Usos domésticos
- Servicios públicos urbanos
- Abrevaderos de ganado
- Riego de terrenos
- Industrias
- Acuacultura
- Generación de energía eléctrica
- Otros no especificados

A continuación se hace una descripción de cada uno de ellos.

I.2.1 Uso doméstico

Es el uso, desde el punto de vista del ser humano, con mayor importancia, ya que es el agua que consumirá directamente, bien sea como agua potable, usos culinarios o en alguno de otros fines como lo son la higiene personal, lavado del vestido o la vivienda y sanitarios.

En el Cuadro I.2 se muestran las características y químicas que debe observar un agua con calidad de potable, de la misma forma, el Cuadro I.3 muestra las propiedades biológicas, que se deben cumplir invariablemente si se le destinará a este uso.

I.2.2 Uso agropecuario

Son los usos que le siguen en importancia (según la ley antes mencionada) a los usos domésticos y se refiere al agua apta para el consumo ganadero y la procreación y fomento de vida silvestre (sin incluir a vertebrados domésticos ni peces). Se aprecian dos formas de diferenciación: agua destinada al consumo de ganado y la destinada al riego agrícola.

Agua para abrevaderos

Para este uso, el agua debiera satisfacer características similares a las del consumo humano. Sin embargo, existen diferencias que dependen del tipo de ganado que la va a consumir y están basadas básicamente en la salinidad que contiene el agua.

Agua para riego agrícola

En este uso es necesario considerar su calidad en relación al clima y al tipo de plantas y suelos. Cabe mencionar que esta interrelación está dada por los métodos de riego, capacidad del sistema de distribución, trabajos de drenaje y el área a regar. El Cuadro 1.4 muestra la clasificación de agua para riego agrícola.

I.2.3 Uso industrial

La industria es uno de los solicitantes que mayor cantidad de agua demandan y sus usos son muy variados, los cuales se pueden clasificar de acuerdo al tipo de industria de que se trate. En cuanto al uso asignado, son cuatro las principales prácticas que se llevan a cabo en la mayoría de las industrias consumidoras de agua:

- Agua de enfriamiento
- Agua para calderas (en la generación de vapor)
- Agua de proceso (aquella que se incorpora en la manufactura del producto terminado, o el agua empleada como medio de transporte de los productos)
- Agua para usos generales (se incluye la limpieza de las instalaciones, usos personales y en ocasiones el riego de prados y jardines)

Como son tantos los tipos de industrias y demasiados los procesos que utilizan el agua como su factor más importante en su tren de producción, es imposible establecer un criterio general sobre la calidad del agua deseable. En este aspecto se han elaborado estudios completos respecto a los criterios de calidad requeridos para algunas industrias.

I.2.4 Agua para acuicultura

Es el agua capaz de sostener y permitir la propagación de actividades acuícolas, en donde se distinguen dos tipos de especies que necesitan de diferentes parámetros de calidad, entre los cuales está la temperatura. Los límites máximos para esta clasificación son 18.2 C y 29.9 C para las especies de agua fría y caliente, respectivamente.

En cuanto a la calidad, el oxígeno disuelto en aquel parámetro que se requerirá en cantidades inferiores, debido principalmente a la relación temperatura del agua- solubilidad del oxígeno, para las especies de agua caliente.

I.2.5 Agua para recreación

Como su nombre lo indica, es el agua para uso en actividades recreativas y deportivas. En este caso se distinguen dos clasificaciones. La primera se destina al uso con contacto primario y la segunda sin contacto primario prolongado.

Uso recreativo con contacto primario

Es el uso en que el agua en la que el ser humano estará sumergido o en contacto prolongado con ella. Estas actividades incluyen natación y esquí acuático.

El agua para este uso requerirá de ciertas características que no pongan en peligro la salud de los usuarios. Por ejemplo, deberá estar virtualmente libre de sustancias como aceites, grasas, materia flotante y libre de crecimiento acuático desagradable. Deberá, asimismo, considerarse libre de organismos patógenos y sustancias tóxicas que pudieran causar irritación de los ojos o la piel. También el agua deberá ser lo suficientemente clara para permitir localizar objetos sumergidos. La ingestión de cantidades limitadas de agua no deberá causar enfermedad alguna.

Uso recreativo sin contacto directo prolongado

Es el uso en el cual el agua con la que el ser humano entra en contacto sólo ocasionalmente y por periodos de tiempo limitados. Estas actividades incluyen el remo, chapoteo, veleo, etc.

Entre los criterios de calidad existentes están los siguientes: el agua deberá ser estéticamente aceptable, virtualmente libre de sustancias como aceites, grasas, materia flotante y libre de crecimiento masivo de plantas acuáticas que pudieran provocar olor desagradable o dificultades para su uso. La ingestión de cantidades pequeñas de agua no deberá ser peligroso para la salud.

A modo de resumen, el Cuadro I.5 muestra los criterios de calidad para los diferentes tipos de uso que se han enumerado. Los espacios en blanco son parámetros que no están considerados para ese uso.

I.3 La desalación de agua de mar como opción de aprovechamiento

La humanidad siempre ha buscado la posibilidad de conseguir agua de fuentes que ofrezcan buena calidad y que de alguna manera se encuentren localizadas a corta distancia, siempre cuidando su economía. Sin embargo, esto no ha sido siempre factible, en gran parte debido a que la cantidad y la calidad de las aguas se ha visto mermada por el constante crecimiento demográfico y por el descuido que el hombre ha mostrado en su disposición. Esto ha traído como consecuencia que los lagos, ríos y acuíferos estén contaminados en un alto grado, haciendo difícil su purificación y explotación. Para otros, la nula existencia o la muy difícil disposición de fuentes de obtención ha sido un obstáculo en el desarrollo del recurso hidráulico.

Aunque, como se mencionó anteriormente, la tierra está cubierta en sus dos terceras partes de agua y la energía del sol guía un constante ciclo de evaporación, condensación en nubes y precipitación, el hombre no ha tenido la capacidad de influir, con su actual tecnología, lo suficiente para satisfacer sus requerimientos de agua dulce. Además, en la misma proporción en que se incrementa su demanda de agua de buena calidad y en cantidad suficiente, lo hace el costo de adquirirla. El abastecimiento de agua en zonas no áridas puede tomar forma de captación en ríos, acuíferos, lagos y, por supuesto, el reúso de aguas residuales tratadas. Sin embargo, son las zonas áridas y semiáridas del mundo en las que el abastecimiento de agua se hace más crítico, ya que ésta, o se encuentra a grandes profundidades, o a grandes distancias, haciendo que en muchas ocasiones el agua de mar sea el único recurso disponible y aprovechable.

Sin embargo y como se podría pensar, la desalación de agua no sólo se aplica a aquella de mar, sino también de aquellas aguas subterráneas con altos contenidos de sales disueltas (aguas salobres) pero sin llegar a las concentraciones típicas de un agua marina y no sólo se efectúa con fines específicos como lo es el industrial, sino también para el abastecimiento de agua a poblaciones, riego agrícola y, en muchas ocasiones, para uso recreativo. El fenómeno de intrusión salina y el tipo de subsuelo que se encuentre en determinado lugar, contribuyen a que la poca agua dulce que haya en algún lugar determinado se vaya desplazando cada vez más y más tierra adentro, haciendo que en determinado momento los acuíferos sólo contengan agua salobre. Es en estos casos cuando la situación se vuelve crítica, haciendo que se tengan que emplear tecnologías modernas para la captación de agua. Así por ejemplo, están las plantas desaladoras de las Islas Canarias, España, para el cultivo de tomates; de las termoeléctricas

de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) de Rosarito, Baja California, para el abastecimiento de agua a la población; las industrias refresqueras de Coca-Cola en Cancún, México; las cerveceras de Heineken, Holanda y, aunque ahora ya no está en operación, la planta desaladora de La Paz, Baja California Sur, que abastecía de agua a una gran parte de esta ciudad.

I.4 La desalación de agua de mar en la República Mexicana

En la República Mexicana existen organismos encargados de operar y administrar las aguas marinas y salobres. En 1971, con la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos, se constituyó la Comisión para el Aprovechamiento de Aguas Salinas; posteriormente, en 1977, la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas creó la Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar, la cual estuvo a cargo de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos hasta 1989, y pasó a formar parte de la actual Comisión Nacional del Agua bajo el mismo nombre y siglas DIGAASES. Entre sus principales funciones están la investigación y desarrollo de tecnologías propias en desalación; la selección de procesos idóneos; elaboración de estudios y selección de materiales resistentes, así como estudios socioeconómicos que justifiquen la dotación por este método; y el diseño, construcción, operación y administración de plantas e instalaciones para agua marina y salobre.

Aunque son pocas las instalaciones de desalación existentes en México, en relación a otros países, y los logros de la tecnología nacional en esta materia rara vez llegan más allá de las fronteras y la literatura técnica también rara vez la menciona, las experiencias acumuladas en el país en todos los proyectos de desalación son extensas y muy variadas. Así, los primeros indicios de desalación en México, a nivel experimental, se dieron en Puerto Peñasco, Sonora, cuando se construyó una planta experimental, operada por un programa conjunto entre la Universidad de Sonora y la Universidad de Arizona, en Estados Unidos. En 1964, la Comisión Federal de Electricidad instala dos plantas desaladoras en la ciudad de Rosarito, Baja California. Cada planta con una capacidad de producción de 28,000 m³/día, en el aprovechamiento de la energía calorífica generada por la planta termoeléctrica de la ciudad.

En los finales de los años setentas ya se contaba en México con experiencia en el diseño y operación de plantas destiladoras del tipo efecto múltiple (multieffect distillation). Así, se instala en la ciudad de La Paz, Baja California Sur, una planta con capacidad de producir 10 m³/día (actualmente ya no se encuentra en operación).

De esta manera, el éxito obtenido en la desalación de mar llevó a que en los mismos finales de los setentas y principios de los ochentas, personal mexicano desarrollara una tecnología 100% nacional en los procesos de Evaporación Instantánea por Etapas, instalando plantas desaladoras en Bahía de Tortugas, B.C.S. (200 m³/día); Pichilingüe, B.C.S. (1,000 m³/día) y la rehabilitación de la planta situada en Cozumel, Quintana Roo (1,000 m³/día).

En resumen, la desalación de agua de mar se plantea como una opción a escoger, factible desde el punto de vista técnico y económico, sobre todo para esas poblaciones y núcleos poblacionales que por sus condiciones geográficas se encuentren desprovistos de fuentes suficientes de agua.

CUADRO I.1
VOLUMENES DE AGUA EN LA HIDROSPERA

CUERPO DE AGUA	VOLUMEN (*)	PORCIENTO DEL VOLUMEN TOTAL
Océano mundial	1,370,323	93.93
Aguas subterráneas total	60,000	4.12
Aguas superficiales en zonas de intercambio activo	4,000	.27
Glaciares	24,000	1.65
Lagos	230	.016
Vapor atmosférico	14	.001
Ríos	1	.0001
T O T A L	1,454,651	100.00

(*) Volumen en miles de kilómetros cúbicos

FUENTE: Murguía Vaca Ernesto, Evaluación, Efectos y Solución de la Contaminación del Agua, Facultad de Ingeniería, U.N.A.M., México

CUADRO I.2
CARACTERISTICAS FISICAS Y QUIMICAS PARA AGUA POTABLE

COMPONENTE	UNIDAD	MEXICO	OMS
CARACTERISTICAS FISICAS			
Turbiedad	Silice	10	25
pH	---	6.0-8.0	6.5-9.5
Olor	---	inodora	inobjetable
Sabor	---	agradable	inobjetable
Color	Pt-Co	20	50
CARACTERISTICAS QUIMICAS			
Nitrógeno amoniacal	mg/l	.50	---
Nitrógeno orgánico	mg/l	.10	---
Nitrógeno de nitritos	mg/l	5.00	---
Oxígeno consumido en medio ácido	mg/l	3.00	---
Sólidos totales	mg/l	1000.00	1500.00
Alcalinidad total en CaCO ₃	mg/l	400.00	---
Dureza total en CaCO ₃	mg/l	300.00	---
Dureza permanente en CaCO ₃	mg/l	150.00	---
Cloruros	mg/l	250.00	350.00
Sulfatos	mg/l	250.00	400.00
Magnesio	mg/l	125.00	125.00
Zinc	mg/l	15.00	5.00
Cobre	mg/l	3.00	1.00
Fluoruros	mg/l	1.50	1.50
Fierro y manganeso	mg/l	.30	.30
Plomo	mg/l	.10	.10
Arsénico	mg/l	.05	.05
Selenio	mg/l	.03	.01
Cromo hexavalente	mg/l	.05	.05
Fenoles	mg/l	.001	.001
Cloro libre	mg/l	1.00	---

FUENTE: S.A.R.H., Índice de Calidad del Agua, Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica, México, 1979.

CUADRO I.3
PROPIEDADES BIOLÓGICAS DEL AGUA

MEXICO

a) Menos de 20 organismos de los grupos coli y coliforme por litro de muestra, definiéndose como organismos coli y coliforme a todos los bacilos aerobios o anaerobios facultativos no esporógenos, gram negativos que fermentan el caldo lactosado con formación de gas.

b) Menos de 200 colonias bacterianas por mililitro de muestra en la placa de agar incubado a 37°C por 24 hrs.

c) Ausencia de colonias bacterianas licuantes de la gelatina, cromógenas o fétidas en la siembra de un ml de muestra en gelatina incubada a 20°C por 48 hrs.

O.M.S.

a) Ausencia de coliformes en una muestra de 100 ml de agua en el caso de agua tratada con cloro

b) Ausencia de escherichia coli en una muestra de 100 ml en el caso de agua no tratada con cloro

c) Máximo 3 coliformes en una muestra de 100 ml en el caso de agua no tratada con cloro

d) La proporción de muestras de 100 ml exentas de coliformes no será inferior al 95%

e) Ninguna muestra contendrá más de 10 coliformes por 100 ml.

f) No se detectarán coliformes en 2 muestras sucesivas de 100 ml.

FUENTE: Degrémont, Manual Técnico del Agua, España, 1979
"Reglamento Federal de la Dirección de Ingeniería Sanitaria sobre Obras de Provisión de Agua Potable",
Secretaría de Salubridad y Asistencia, México.

COADRO I.4
CLASIFICACION DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA

CLASE DE AGUA	% DE SODIO	CONDUCTIVIDAD (umhos/cm)	BORO (mg/l)		
			Cultivos Sensitivos	Cultivos Semitolerantes	Cultivos Tolerantes
Excelente	< 20	< 250	.33	< 0.67	< 1.00
Buena	20-40	250-750	0.33-0.67	0.67-1.33	1.00-2.00
Permisible	40-60	750-2000	0.67-1.00	1.33-2.00	2.00-3.00
Dudosa	60-80	2000-3000	1.00-1.25	2.00-2.50	3.00-3.75
Inaceptable	> 80	> 3000	> 1.25	> 2.50	> 3.75

CLASIFICACION DEL AGUA EN FUNCION DE LA RELACION DE ADSORCION DE SODIO

CALIDAD DE AGUA R.A.S.

Excelente	< 10
Buena	10-18
Regular	18-26
Mala	> 26

RAS: Relación de adsorción de sodio

FUENTE: Wilcox, L.V., "Classification and Use of Irrigation Waters"
U.S. Department of Agriculture, Circular 969, Washington, D.C.
1955

CUADRO 1.5
CRITERIOS DE CALIDAD PARA DIFERENTES USOS
(en mg/l salvo que se indique de otra forma)

Parámetro	USOS DEL		AGUA		Acuicultura		Uso
	Maravibras y vida silvestre	Blago agrícola y forrajes	Industria de aligantos y aliamos	Industria de químicos y sellares	Agua fría	Agua caliente recreativa	
Alcolez			0				
Alcalinidad	30-150 (1)		200	500	C.N.+25%		
Aluminio	5.00	5.00					5
Arsénico	.20	.10	.05		.05	.05	.10
Bario			1	1		5	
Berilio		.10			.011 - 1.1	.011-1.1	.10
Bicarbonatos			600	600			
Boro	5.00	0.7-3.0					1
Cadmita	.05	.10	.01		.0004-.015	.006-0.15	.01
Calcio			100	250			
Clanuro			.01	.005	.005	.005	
Cloruro			200	500			100
Cloro					.002	.002	
Cobalto	1.00	.05					.05
Cobre	.50	.20	1	.01-.04	.01-.04	.01-.04	.20
Coliformes fecales (MP/100 ml)	1000	1000 MP/100 ml					2,20
Coliformes totales (MP/100 ml)	5000		2,20				5000
Color (Pt-Co)			5	500	C.N.+10%	C.N.+10%	
Cromo	1.00	1.00	.05	.10	.10	.10	.10
Demanda biológica de oxígeno	0		0	0			20
Demanda química de oxígeno			0	0			60
Dureza			200	1000			
Fenoles	1,000	50.00	.001		.0001	.0001	50
Hierro	2.00	5.00	.20	10	.50	.50	5
Fluoruro	2.00	1.00				1.50	2
Fósfor			1		1.50		
Grasas y aceites	Libre				0	0	0
Hagnesio			50	100			
Manganeso	.05	.20	.10	2	1	1	.20
Mercurio	.001			100	.00005	.00005	
Nitrógeno NH3-N				1	.02	.02	
N-NO2	10		0		.05-.4	.05-.4	.20
N-NO3	100		10		5	5	
Niquel				1			
Oxígeno disuelto	7.0 - 9.0	4.5 - 9.0	7.0 - 8.5	5.9 - 9.0	6.5-9.0	6.5-9.0	6.0-9.0
pH	(3)						
Pesticidas							
Plast			.05		.0001-.0025	.0001-.0025	
Plozo	.20	5.00			.004-.15	.004-.15	5
Radioactividad	(3)						
Salinidad	3,000						
Selenio	.05	.02	.01		.05	.05	.02
Silice			50				
Sólidos disueltos	3,000.00	4700	500	2500	2000	2000	4200
Sólidos suspendidos			10	10000	25	25	15
Sulfatos			250	850			200 - 400
Turbiedad			5		C.N.+10%	C.N.+10%	
Vanadio	.10	.10					.10
Zinc	25.00	2	5		.05-.6	.05-.6	2

- (1) La fluctuación no debe ser mayor de 50 mg/l
(2) Implica reducir el déficit a menos de 0.2 mg/l
(3) Los mismos que para las normas de agua potable

FUENTE: Recomendaciones de la "National Academy of Sciences", Water Quality Criteria, 1972.

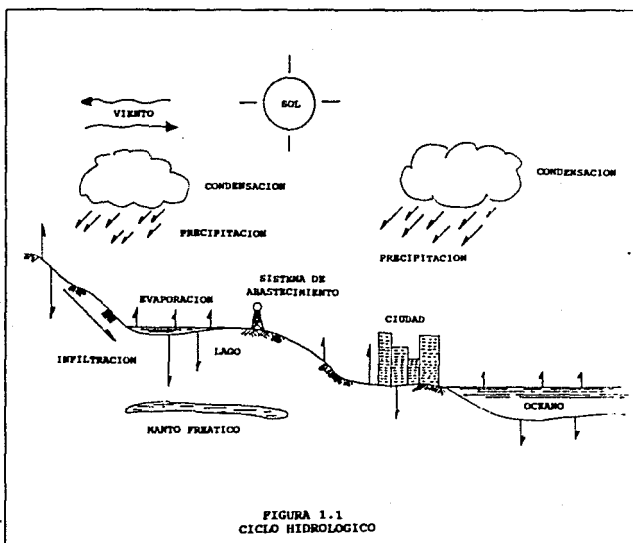


FIGURA 1.1
CICLO HIDROLOGICO



FIGURA 1.2
IDENTIFICACION DE SITIOS CON CONFLICTOS DE ABASTECIMIENTO



FIGURA I.3
 IDENTIFICACION DE ZONAS CON CONFLICTOS DE
 DISPONIBILIDAD DE AGUA POTABLE EN LA REPUBLICA
 MEXICANA

II. DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE DESALACION

II. DESCRIPCION DE LOS PROCESOS DE DESALACION

II.1 Introducci3n a los procesos de desalaci3n

Los procesos de desalaci3n son muy variados, pero en general en ellos se integran tres tipos de tecnologías y entre estas mismas hay variantes. En dichas tecnologías est3n las basadas en procesos t3rnicos, las de procesos físicos y las de procesos electroquímicos, aunque propiamente dicho, los procesos t3rnicos son procesos físicos al igual que los electroquímicos, al fin y al cabo.

Los procesos de desalaci3n se pueden clasificar, a grandes rasgos, de la siguiente manera:

PRINCIPIOS DE LOS PROCESOS DE DESALACION

PRINCIPIO	PROCESO
T3rnico	Destilaci3n Congelamiento
Físico	Osmosis inversa
Electroquímico	Electrodiálisis

Los procesos t3rnicos incluyen una transformaci3n de una masa de agua líquida a una gaseosa, para posteriormente transformarla nuevamente a su estado líquido, tal y como sucede en la destilaci3n. En cambio, en el congelamiento, el agua, de un estado líquido, se transforma a uno s3lido, en el cual la masa de

agua con las sales disueltas queda parcialmente separada. La masa de agua restante (sin sales disueltas) se vuelve a licuificar.

En el proceso físico de la ósmosis inversa se aplica una fuerza de presión para que el agua se "filtre" a través de un "medio filtrante" comunmente llamado membrana semipermeable, deteniendo ésta el paso las sales disueltas.

Los procesos electroquímicos toman ventaja de las mismas características electroquímicas del agua, para separar de ésta las sales disueltas, también a través de una membrana semipermeable, al inducir una corriente eléctrica en el flujo de agua.

La Figura II.1 esquematiza los conceptos anteriores.

Todos los procesos integran una serie de ecuaciones físicas, termodinámicas y químicas, lo cual los hacen extremadamente complejos. Por esta razón, el objetivo de este trabajo es presentar e introducir al lector al conocimiento de la desalación, sus principales procesos, tecnologías y variantes, de una manera fácil y sencilla, dando a conocer los términos más comunmente utilizados, sus generalidades y las aplicaciones de cada uno de ellos.

II.2 Generalidades de los procesos de desalación

Las tecnologías de mayor uso en la desalación de agua son la destilación (con varias modalidades en la evaporación de la masa de agua salobre), ósmosis inversa, electrodiálisis, electrodiálisis inversa y el congelamiento. Este, aún cuando se usa en determinadas ocasiones con diferentes objetivos (grados de pureza de agua, disponibilidad del gas butano para el congelamiento, instalaciones adecuadas, etc.), no es uno de los más utilizados en la obtención de grandes gastos de agua.

No todos los procesos son igualmente eficientes en la remoción de sales disueltas; hay varios factores que afectan dicha separación. La Figura II.2 muestra los rangos útiles de varios procesos de separación de sales.

En la Figura II.3 se muestran los rangos típicos de sólidos disueltos totales (SDT) para los procesos de desalación. La ósmosis inversa se utiliza para influentes con contenidos de SDT desde 100-45,000 mg/l (concentraciones típicas de agua de mar). La electrodiálisis y electrodiálisis inversa son usadas cuando se tienen concentraciones desde 100 hasta 10,000 mg/l. La destilación y otros procesos térmicos son usados principalmente

para tratar agua marina y algunas aplicaciones industriales específicas, tal y como la concentración de salmuera, con concentraciones de SDT desde 10,000 hasta 100,000 mg/l. Otros, como el intercambio iónico, son factibles de usar en el tratamiento de influentes con concentraciones de SDT en el rango de 100-800 mg/l.

La salinidad típica del agua de mar es de 35,000 mg/l, de la que 30,000 mg/l está formada por cloruro de sodio y los restantes 5,000 mg/l de otras sales. La norma de calidad generalmente aceptada para un agua con calidad de potable es de 500 mg/l de sólidos disueltos totales y 250 mg/l de cloruros, aún cuando para algunos lugares (como México), se aceptan concentraciones de SDT hasta de 1000 mg/l (la Organización Mundial de la Salud establece hasta 1500 mg/l). En cambio, un agua salobre tiene, en promedio, una salinidad de hasta 10,000-12,000 mg/l de sales disueltas. Es obvio que el proceso a elegir dependerá del tipo de agua de que se trate (marina o salobre) y del fin a que se destine el agua ya tratada.

A continuación se describen los diferentes procesos de desalación.

II.3 Osmosis inversa

II.3.1 Generalidades

Como se comentó anteriormente, la ósmosis inversa tiene sus bases en la filtración del agua a través de una membrana. Para ser útil como un medio de separación, ésta debe transportar unas moléculas más rápidamente que otras, teniendo así una alta permeabilidad para algunos elementos y baja para otros. En otras palabras, debe ser altamente selectiva. Este proceso de filtración selectiva ha sido reconocido por el hombre y utilizado para el tratamiento de aguas destinadas al consumo humano hace ya varias décadas, pero sólo ha sido de manera reciente que los investigadores han empezado a indagar el amplio espectro de posibilidades en relación a los procesos de membrana.

La ósmosis es un proceso a través del cual se realiza el transporte de un solvente en una solución a otra solución más concentrada, por medio de una membrana semipermeable que impide el paso del soluto pero no de la solución, como se describió anteriormente. Es un proceso natural que ocurre en todas las células vivas permitiendo la vida, ya que se induce a que el agua fluya por difusión desde zonas donde se encuentra relativamente pura, con baja concentración de sales, a zonas

donde hay una alta concentración. En consecuencia, se obtiene la extracción de agua pura del medio ambiente. Este fenómeno de la ósmosis se aplica en todo el reino vegetal.

Para detener este proceso osmótico se debe aplicar, en cierta parte del sistema, una contrapresión, de tal magnitud que pueda balancearlo, de manera que no haya un flujo de agua en ninguna dirección. Este balance de presiones se ha denominado "presión osmótica". La Figura II.4 muestra la definición práctica de este concepto.

Sin embargo, se reconoció que la presión osmótica, comunmente denominada por la letra griega "Pi", varía en función de la concentración y temperatura como la presión de un gas ideal. Por ejemplo, para el agua se tiene la siguiente expresión:

$$\pi^{\circ} = \frac{\bar{n}}{V_m} RT$$

donde:

n: número de moles del soluto
Vm: volumen molecular del agua
R: constante universal de los gases
T: temperatura absoluta

Sin embargo, esta ecuación, como la ley del gas ideal, sólo es válida para soluciones diluidas, por lo tanto, para soluciones concentradas, es necesario modificarla y alterarla con el coeficiente de presión osmótica, esto es:

$$\pi^{\circ} = \phi_c \frac{\bar{n}}{V_m} RT$$

Se tabularon los coeficientes de presión osmótica para varios electrolitos y que varían con la concentración. Dichos coeficientes se muestran en el Cuadro II.1 y, como se puede observar, son menores a la unidad y decrecen con el aumento de la concentración. Empero, esta ecuación es conservadora y predice presiones osmóticas mayores a la observada.

Así por ejemplo, la presión osmótica de agua de mar con un contenido de 35,000 ppm (partes por millón o mg/l) de SDT a 25°C es aproximadamente 26.7 Kg/cm² y para una con 42,000 ppm (como la del Mar Rojo) a 30° C es de 32.7 kg/cm².

II.3.2 Presión neta de trabajo

Por los conceptos antes expuestos y de que el proceso de ósmosis inversa requiere de una presión para permear el agua salada, el caso más práctico para la operación de un sistema de ósmosis inversa es cuando dicha presión aplicada al agua salada es superior a la presión osmótica de dicha solución. Por lo tanto, el efecto que causa esta presión es la obtención de un mayor volumen de agua purificada cuando se efectúa el proceso. Este principio es el que se aplica en una planta bajo este proceso a nivel industrial.

La Figura II.5 muestra un modelo de ósmosis inverda al cual se le aplica la presión neta de trabajo. Como se puede observar, cuando se mide la diferencia de altura en las columnas, se puede determinar la presión neta de trabajo (P_{net}). Esta es la presión hidrostática total (P_{tot}) menos la presión ejercida por la presión osmótica. Esta es la fuerza que se tiene que vencer para que haya un flujo de agua pura (sin sales). Sin embargo, esto es completamente teórico, ya que en la realidad hay grandes pérdidas de presiones debidas a la fricción, cambios de dirección, ampliaciones y reducciones, así como por el ensuciamiento y atascamiento de las membranas. Por esto, se debe tener en cuenta y sustraer la presión diferencial (DP). En consecuencia, nos resulta una ecuación del tipo siguiente:

$$P_{net} = (P_{tot} - DP - \pi)$$

Debido a que la presión de trabajo depende de la presión osmótica, la determinación de la misma para la solución que se va a separar es fundamental para saber si la ósmosis inversa es un proceso factible de aplicar. A modo de ejemplo, para una planta desaladora de agua de mar, siendo la presión osmótica de ésta aproximadamente 400 psi, tendrá que operar como mínimo a 600 psi para vencer la presión osmótica y, con mucha frecuencia, operará a 800 y 1000 psi para lograr ser aún más rentable.

Si se analiza teóricamente la cantidad de agua que puede pasar por una membrana, ese gasto está en función básicamente de dos cosas: la primera, la presión osmótica de la solución y, la segunda, del área de la membrana. Ambas en proporción directa.

Por lo tanto, si doblamos la presión neta de trabajo, se duplica la productividad, así como si duplicamos el área de la membrana, aumentamos en la misma proporción el gasto de agua permeada. Esto se ilustra en la Figura II.6.

La aplicación práctica de este caso es que, si por alguna razón la planta deja de proporcionar el gasto requerido, siempre se puede considerar la instalación de una mayor superficie de membrana y así aumentar el gasto. Claro está que, por continuidad en la ecuación que rige el gasto, si aumentamos al doble el área de membrana, la presión requerida disminuirá a la mitad. Desde el punto de vista práctico, esto es muy útil, puesto que se baja la presión de operación y en consecuencia los costos.

La ecuación que ilustra lo anterior se expresa de la siguiente forma:

$$Q_a = A \times a \times (P_{tot} - DP - \pi)$$

donde:

A: área de la membrana

a: coeficiente de permeabilidad de la membrana

De lo anterior se ve que, mientras más delgada la membrana, mayor será el valor del coeficiente "a".

II.3.3 La productividad de la ósmosis inversa

Quizás el factor de diseño y operación más importante es el área superficial de las membranas instaladas en una planta. Este factor, clave en el diseño de un sistema de ósmosis inversa, se mide como productividad en galones por día por pie cuadrado de membrana y se denomina GFD (Gallons-Foot-Day) el cual determina si el diseño es o no conservador.

Las membranas originales de acetato de celulosa desarrolladas en 1962 apenas podían producir 10 GFD, inclusive a presiones altas. Por entonces, el problema fundamental era lograr que dicho parámetro aumentase y hacer la tecnología más eficiente y más rentable, entre otras cosas. Ahora en día existen membranas ultradelgadas fabricadas con polímeros tan eficientes

que permiten tener grandes GFD con presiones bajas. Hay, inclusive, un abuso en este factor, al instalar plantas equipadas con bombas de muy alta presión. De hecho hay plantas equipadas con membranas de agua salobre operando en México a 35 GFD, dentro de los límites de 600 psi, establecidos por el fabricante para las membranas de agua salobre. Sin embargo, aunque este factor da muchas ventajas, se pueden presentar problemas de operación, como los que se mencionan a continuación.

A una presión fija y para cada tipo de agua, una membrana proporcionará una determinada cantidad de agua limpia. Claro está que si se fuerza a aumentar la productividad por metro cuadrado, desalará más agua en menos tiempo, con el consecuente ensuciamiento prematuro de la membrana, aumentando el número de limpiezas y acortando su vida útil. Sin embargo, la relación entre el GFD y el ensuciamiento es directa hasta cierto punto. Las experiencias en plantas de ósmosis inversa reportan que, cuando el GFD se duplica, el ensuciamiento y deterioro se afecta en un factor de cuatro veces, y si está por arriba de treinta, el deterioro se vuelve exponencial. Haciendo un poco aparte el factor temperatura, lo anterior se complica un poco si se aumenta tanto el GFD como la presión de operación a un valor superior al de diseño. Son estas las razones por las cuales los fabricantes de membranas recomiendan que no se exceda el GFD de diseño.

II.3.4 Factor de conversión

Hasta ahora, la totalidad del influente se ha hecho pasar a través de la membrana. En este caso se estaría aprovechando todo el mismo, o sea, recuperando el 100% de agua invertida en el proceso. Sin embargo, esto no es posible en la realidad, por lo que la conversión o recuperación en una planta se define como el porcentaje de agua de alimentación que se extrae como producto y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Gasto del agua producto}}{\text{Gasto del influente}} \times 100$$

Es claro que, con base en lo ya expuesto, no se puede operar una planta al 100% de conversión, debido a que la salmuera o agua de rechazo ocasionaría una precipitación e incrustación de sales sobre la membrana.

Sin embargo, si se desea tener una alta recuperación, hay que tomar en cuenta el número de pasos que nuestra planta necesita. A modo de ejemplo, si se requiere una conversión del 87%, se pueden implementar tres pasos. El primero recupera el 50% del agua que le llega y rechazará el 50% restante, que serán la

alimentación del segundo paso que, con la misma eficiencia que el primero, recuperará el 50% y rechazará el otro 50%; de la misma forma el tercer paso. Si el gasto de entrada son 100 l/s, en el primer paso se recuperan 50 l/s, en el segundo 25 l/s y en el tercero 12 l/s. En total, de 100 l/s se obtuvieron 87, o sea, un 87% de conversión. Como se puede observar en la Figura II.7, el primer paso constó de cuatro membranas en paralelo, el segundo de dos y el tercero de una, todos los pasos conectados en serie.

II.3.5 El factor Beta

Cuando existe flujo laminar, la concentración de sales en la capa límite pegada a las membranas tiende a precipitarlas sobre la superficie de aquellas. Este fenómeno ha sido comprobado y estudiado y se conoce actualmente como la polarización. El factor de polarización se conoce en la industria como el Factor Beta y es calculado por el fabricante durante el diseño de cada planta.

Normalmente los fabricantes diseñan sus membranas de tal manera que el Factor Beta nunca exceda el 1.13, es decir, que la concentración de sales en la capa límite nunca sea de más de un 13% superior al promedio en la salmuera. La Figura II.8 muestra la relación de este factor como función del factor de conversión.

II.3.6 Tipos de membranas para ósmosis inversa

Los dos tipos de membranas o permeadores más usados en equipos de ósmosis inversa son la fibra hueca y en espiral. Ambos ofrecen diferentes factores de conversión y de instalación. El permeador en espiral tiene la ventaja de lograr una mejor recuperación, si se usa una serie de elementos de permeado, mientras que el de fibra hueca, aunque logra una alta recuperación en una sola unidad, está limitado en su recuperación total por razones hidráulicas. La Figura II.9 muestra una vista y corte de un cartucho de membrana de fibra hueca y la Figura II.10 una en espiral.

En el permeador de fibra hueca el agua entra por la tubería de alimentación y se distribuye radialmente a través del "manejo" de fibras huecas dispuestas a lo largo de todo el cartucho. La presión con que entra el agua permite que ésta pase a través de las paredes de las fibras, rechazando la salmuera y recolectándola para regresarla por los tubos de agua concentrada. El agua permeada fluye por el interior de las fibras y se concentra en el final del cartucho.

El cartucho de membranas en espiral consiste en varias de éstas puestas en forma alternada en un cilindro. Dos membranas se colocan juntas junto a un espaciador y los tres elementos se sellan para formar un "sobre". El agua de alimentación entra por la parte exterior del cilindro, el agua se filtra a través de dicho "sobre", pasa a través de los espaciadores para su recolección en el tubo central y la salmuera de rechazo se recolecta para su disposición en la misma zona exterior.

La experiencia en la operación de plantas de este tipo indica que la membrana de tipo espiral tolera aguas con mucho más materia coloidal y sales incrustantes que el de fibra hueca. La prestigiada firma DuPont recomienda el uso de membranas de tipo espiral, debido a que pueden trabajar con gastos de alimentación por elemento hasta tres veces más altos que las de fibra hueca, en las cuales dichos gastos podrían romper las delicadas fibras.

II.3.7 Membranas dinámicas

El hecho de fabricar membranas con una alta calidad es costoso. Sin embargo, otra manera de obtener membranas con un alto rechazo de sales es fabricar una pero que no sea tan perfecta, pero adicionándole un polímero para contrarrestar esas imperfecciones. Este procedimiento es muy necesario en la fabricación de membranas de fibra hueca delgada, ya que cada permeador contiene miles de fibras y es prácticamente imposible detectar y controlar las imperfecciones de cada una de ellas. En otras palabras, se hacen "parches químicos". Los polímeros más comunes son el ácido tánico y polímeros tipo PTA.

II.3.8 Cantidad y calidad del agua producto

Al aumentar la presión de operación y disminuir el área de membranas se mejora la calidad del agua producto, si la calidad de las membranas no fue mejorada con polímeros. Lo anterior se ilustra en la Figura II.11. En ella se observa que al aumentar la presión de operación, los SDT disminuyen, al mismo tiempo que el GFD aumenta. Por lo tanto, por qué no es posible operar plantas de ósmosis inversa a presiones de 1200 y 1500 psi?

Como se comentó anteriormente, al operar a muy altas presiones se está violando la regla del GFD, además de que estos sistemas consumen demasiada energía eléctrica; inclusive, la operación a altas presiones es un paso hacia atrás. Hace quince años, cuando no existían buenas membranas ni polímeros que las mejoraran, las plantas de ósmosis inversa operaban con presiones de 1,500 a 2,000 psi. Hoy en día, la presión más común es de 800 a 1,000 psi.

Como se puede ver en la Figura II.12, los sistemas promovidos por los fabricantes de membranas de fibra hueca tienen un consumo de energía mínimo de casi 6.2 kWh/m³, aunque se opere la planta al 45% de conversión y se instale una turbina para recuperar la energía de alta presión del agua de rechazo.

Parte del problema de los ciclos de alta presión es que para que el consumo energético no se torne oneroso, se obliga a operar la planta a una alta recuperación. Lo que ocurre es que entonces la salinidad de la salmuera es mayor y, por ende, la presión osmótica de la salmuera dentro de la planta aumenta proporcionalmente. Lo anterior se ilustra en el Cuadro II.2.

II.3.9 Sistemas paquete de ósmosis inversa

Hasta ahora sólo se ha venido comentando acerca de los diferentes parámetros de diseño de una planta de ósmosis inversa. Es conveniente resaltar la importancia de describir, en términos generales, el funcionamiento de una unidad de ósmosis inversa.

El agua de alimentación o influente normalmente contiene sustancias en suspensión y, siendo de mar, muy probablemente materia orgánica. Por esto, a manera de pretratamiento y dependiendo de su calidad, se le agregan coagulantes y cloro; los coagulantes para aglomerar las partículas en suspensión y posteriormente filtrarlas, el cloro para eliminar la acción de las partículas orgánicas. Seguido de esto, el flujo de agua se pasa por un medio filtrante, para tratar de remover la mayor cantidad de la materia aglomerada. El agua ya filtrada pasa por un segundo filtro, para la remoción de los sólidos que hayan logrado traspasar el primero. A esta agua pretratada se le añade un inhibidor de incrustaciones para evitar que se formen costras en los ductos y tuberías del sistema, obstruyendo el fácil paso del flujo de agua. Ya tratada de esta manera, una bomba de presión la conduce hasta el módulo de cartuchos, ya sean de tipo fibra hueca o en espiral. Este módulo de permeado está provisto de una válvula, con la cual se regula la salida de la salmuera. Parte del agua permeada, junto con una sustancia limpiadora, se destina a agua de retrolavado de los filtros y la restante a agua producto, que finalmente se le añade alguna solución alcalina (opcional) y cloro. La Figura II.13 muestra el diagrama de flujo de una unidad de ósmosis inversa.

II.4 Destilación

La destilación es un proceso competitivo, desde el punto de vista económico, para la desalación de agua con altos contenidos de sales, dado que el proceso opera virtualmente en forma independiente de la concentración de sólidos en el influente. Sin embargo, una característica de los sistemas de destilación es que consumen grandes cantidades de combustible, para alcanzar las temperaturas requeridas de evaporación, lo cual no sucede con otros procesos como la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

A grandes rasgos, la destilación involucra elevar la temperatura del agua hasta el punto de evaporación bajo determinadas condiciones de presión, llevar el agua a forma de vapor y luego condensarla, para obtener un agua libre de sales.

II.4.1 Generalidades de la destilación

Aún cuando la destilación incluye un proceso continuo de evaporación-condensación, sus fundamentos teóricos van más allá, involucrando una serie de ecuaciones físicas y termodinámicas, siendo éstas las que gobiernan en una planta industrial de destilación.

Primeramente hay que partir de dos circunstancias: es bien conocido el hecho de que en todo sistema siempre habrá una cantidad de trabajo mínimo para realizar la separación de agua dulce del agua salada; y también es conocida la circunstancia de que es ley de la naturaleza las pérdidas irreversibles que ocurren en todo tipo de sistemas. Las plantas de destilación no son la excepción. Los siguientes conceptos teóricos se aplican indistintamente a las diferentes variantes de destilación.

II.4.2 Transferencia de calor

La transferencia de calor ocurre cuando hay una diferencia de temperaturas. Así, en una planta de destilación existe la necesidad de evaporar agua de su estado líquido y condensar dicho vapor para formar el destilado o agua producto. El vapor de agua se logra mediante ciertas condiciones de presión y elevando la temperatura del agua. El condensado frecuentemente se logra enfriando dicho vapor por medio de un tubo de alimentación de agua marina (temperatura baja) y cruzando la cámara de evaporación (temperatura alta). De esta manera también se recupera el calor latente de vaporización y precalentando el agua de alimentación, la cual, posteriormente, será evaporada.

Este sistema de recuperación de energía calorífica es el más usado en todas las modalidades de destilación. Por lo tanto, es conveniente analizarlo más de cerca.

En la Figura II.14, en conjunción con la Figura II.15, se observa el mecanismo de transferencia de calor de la cámara de vaporización a los tubos de agua marina. La configuración del tubo se muestra horizontal y los factores que dificultan el proceso de transferencia (comunmente denominados resistencias) están caracterizados por coeficientes de transferencia de calor, que son los siguientes (los valores mostrados se han obtenido en la práctica):

- Coeficiente de transferencia de calor de la interfase:

$$h_i = 113,400 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- Coeficiente de transferencia de calor de la película de condensado:

$$h_l = 11,340 - 14,200 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- Coeficiente de transferencia de calor de la pared del tubo de salmuera:

$$h_t = 68,000 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

- Coeficiente de transferencia de calor de la salmuera:

$$h_w = 13,000 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

El efecto de pérdidas por las incrustaciones del tubo de agua salada está considerado como el factor de pérdidas.

De esta manera y resumiendo:

- h_i resulta de las consideraciones del intercambio molecular

- h_l resulta del drenado del condensado y está ajustado por el proceso de condensación

- h_t está regulado por la conductividad térmica del material del tubo y de su espesor

- h_w es función de las propiedades del fluido y de la velocidad del flujo en los tubos.

Así, el coeficiente de transferencia de calor del sistema "U" se obtiene sumando los diferentes coeficientes antes mencionados. Esto es:

$$1/U = 1/h_i + 1/h_l + 1/h_t + 1/h_w + \text{p\u00e9rdidas}$$

sustituyendo valores nos queda

$$U = 5301.36 \text{ W/m}^2\text{C}$$

El valor del factor de p\u00e9rdidas puede variar desde 0.0005 para tubos limpios hasta 0.001 para condiciones adversas de incrustaciones.

Por lo tanto, el \u00e1rea requerida para transferir una determinada cantidad de flujo de calor est\u00e1 dada por la siguiente expresi\u00f3n:

$$A = \frac{Q}{U \Delta T \log}$$

donde:

Q: es el flujo calor requerido

$\Delta T \log$: es la diferencia media logar\u00edtmica de temperatura (est\u00e1 en funci\u00f3n de la temperatura del vapor, temp. de la salmuera a la entrada y a la salida)

U: coeficiente de transferencia de calor del sistema

II.4.3 Relaci\u00f3n de transferencia de calor

El arreglo esquem\u00e1tico de la Figura II.16 muestra el principio de funcionamiento de la destilaci\u00f3n instant\u00e1nea. El agua marina es calentada por debajo de su punto de ebullici\u00f3n a una presi\u00f3n m\u00e1xima "P max" y a una temperatura m\u00e1xima "t max" en el calentador. Esta agua fluye hacia la c\u00e1mara en donde hay una presi\u00f3n "P1" menor a "P max". Esta reducci\u00f3n de presi\u00f3n causa una evaporaci\u00f3n instant\u00e1nea hasta que la salmuera est\u00e1 en equilibrio termodin\u00e1mico con la condiciones de vapor a "P1 T1" ("T" denota temperatura del vapor y "t" denota temperatura de la salmuera). El vapor formado se condensa traspasando su calor latente hacia los tubos de condensado, los cuales son los mismos por donde fluye el agua marina. De esta manera, el calor de vaporizaci\u00f3n es recuperado y reusado. El condensado cae en una charola de captaci\u00f3n y luego sale de la c\u00e1mara.

Ahora bien, si el coeficiente de transferencia de calor "U" es constante en el sistema, es deseable proporcionar la cantidad de calor m\u00e1s peque\u00f1a que sea posible (por razones econ\u00f3micas) al calentador "t in". Sin embargo, este calor debe ser en magnitud tan cercano como "t max", para que el vapor tenga que proveer una peque\u00f1a diferencia de temperatura (t max -

t in). Para lograr esto, la temperatura de entrada en el agua marina debe ser casi igual a la temperatura del vapor "T1" en la cámara de evaporación.

Utilizando datos típicos de plantas destiladoras, se tiene, usando a la temperatura del vapor como dato "T1", que la diferencia de temperatura entre el agua marina y el vapor (T1 - t b1) puede ser 4.16°C y que la diferencia mínima de temperatura entre el vapor y el agua marina es de 2.78°C. Por lo anterior, el agua marina en los tubos de condensado se ha incrementado en 1.39°C, de la recuperación de calor latente proveniente del vapor de condensado.

La diferencia de temperatura media logarítmica de un condensador se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta T \log = \frac{t_{in} - t_{bi}}{\log \left(\frac{T_1 - t_{bi}}{T_1 - t_{in}} \right)} = \frac{1.38}{\log \left(\frac{4.16}{2.78} \right)}$$

sustituyendo valores, esto resulta

$$= 3.4^\circ\text{C} (6.1^\circ\text{F})$$

Lo anterior se muestra en la **Figura II.17**. La diferencia de temperatura cambiante puede ser reemplazada por la diferencia media logarítmica de temperatura de 3.4°C. Estos números se aplican perfectamente a una planta de destilación de cámaras múltiples, de la cual se describirá su funcionamiento posteriormente.

II.4.4 Factor de rendimiento

El factor de rendimiento "Fr" en una planta de destilación está dado por la relación del total de kilogramos de producto destilado por kilogramo de vapor utilizado en el calentador de agua marina. Esto es:

$$Fr = \frac{\text{kilogramos de producto destilado}}{\text{kilogramos de vapor utilizado}}$$

En un sistema de destilación, lo anterior se observa perfectamente en que una planta con un factor de rendimiento menor, tendrá un cierto porcentaje de reducción en el área de transferencia de calor, comparada con una planta con un factor de rendimiento alto. Así, es recomendable instalar una planta con un factor alto en aquellas localidades donde el combustible es costoso, y una con un factor bajo en aquellos lugares donde el combustible es barato.

II.4.5 Rango de destilación

El rango de destilación para una planta de etapas múltiples es el rango de temperatura sobre el cual la planta trabaja. Para cualquier mecanismo termodinámico que utiliza una fuente que proporciona una temperatura máxima "T max" y una temperatura de contenedor de agua por desalar "T min", el rango máximo posible con el cual puede operar es "T max - T min". Para una planta de destilación, "T min" está dado por condiciones geográficas (temperatura del mar), aunque la temperatura de descarga siempre tendrá que ser mayor que "T min". Así, la temperatura máxima para la planta es "t max", tal y como se muestra en la Figura II.16. Sin embargo, esto tiene varias restricciones, basadas preferentemente en la práctica del control de incrustaciones, por lo que la tecnología ha tenido que ser restringida a una temperatura máxima de 89°C. De esta manera, para lograr un kilogramo de destilado, el influente de agua marina debe circular a una mayor velocidad que el efluente de agua producto.

Así, asumiendo que el calor latente de vaporización "L" del influente de agua marina es 2.33×10^6 Joules/kg (1,000 BTU/lb) y que el rango de destilación es de 55.5°C, el agua marina recirculada por kilogramo de destilado "r" es:

$$r = \frac{L}{C (t \text{ max} - t \text{ descarga})}$$

donde C es el calor específico del agua marina tomado como 4,200 J/kg C.

Así, para un rango de destilación de 89°C, "r" resulta de:

$$r = \frac{2,330,000}{4,200 (89)} = 6.23$$

Es claro que el rango de destilación es un parámetro importante en el diseño de una planta, y está restringido por una bien definida segunda ley de termodinámica, por un lado, y por incrustaciones, por otro.

II.4.6 Procesos de destilación

En el proceso de destilación, factores como el uso eficiente y la recirculación o reuso de la energía, la sucesión de cámaras evaporadoras, los puntos de ebullición y presiones, son utilizados para mejorar la calidad y cantidad del agua producto. De esta manera se han diseñado diversas modalidades dentro de la destilación. Sólo se explicarán sus funciones básicas y algunos conceptos teóricos de importancia.

- Destilación instantánea de cámaras múltiples

A manera de introducción, la Figura II.18 es una planta de destilación de una sola cámara o etapa (de evaporación). Como se observa en dicha figura, la temperatura del agua de mar es elevada en el calentador de agua marina hasta justo antes su temperatura de saturación " t_{max} " a una presión " P_{max} ". Es entonces cuando ingresa en la etapa o "cámara" en donde hay una menor presión " P_1 ". Esta reducción de presión causa que el influente se evapora de manera instantánea, hasta igualar termodinámicamente las condiciones de equilibrio, hasta las condiciones impuestas por " P_1 ". Es entonces cuando la salmuera es rechazada del sistema, permitiendo la entrada de una nueva agua marina.

Ahora, la planta de una sola cámara que se muestra en la Figura II.18 se puede ampliar a " n " cámaras, tal y como se observa en la Figura II.19. La presión en cada cámara es reducida progresivamente hasta que, termodinámicamente, el volumen de vapor, la presión y la temperatura lleguen a un equilibrio impuesto por esta última variable. Para la mayoría de las plantas con este principio, " T_n " es 37.77°C (100°F) y la temperatura máxima " t_{max} " está prescrita por la cantidad de sulfato de calcio (CaSO_4) presente en el influente, y es del orden de los 122°C (250°F).

En general, en un sistema industrial con este proceso, el agua es calentada progresivamente e introducida en una gran cámara, donde una presión inferior a la del punto de ebullición se mantiene en la solución de salmuera caliente. Cuando ésta entra a la cámara, la presión reducida causa inmediatamente a que

parte del líquido hierva instantáneamente. La salmuera restante pasa a través de cámaras similares con presiones menores donde el proceso de ebullición se repite, a cada vez menor temperatura.

El agua de mar se evapora al entrar a la parte baja de cada etapa y el calor cedido por el agua de mar durante la evaporación instantánea se devuelve al proceso, condensando el vapor en un haz de tubos en la parte superior de dicha etapa. El vapor pasa a través de un separador de neblina para remover cualquier gota de salmuera que pudiera ser acarreada. Es entonces cuando el vapor se condensa para formar el agua dulce, producto de la planta.

El vacío de la planta es creado en el inicio del proceso y luego se mantiene por un eyector de vapor que continuamente remueve aire y gases.

El agua de mar, que fluye en el haz de tubos en la parte superior de cada cámara, aumenta cada vez más su temperatura con el paso a través de cada una de dichas cámaras, pero siempre unos grados por abajo del punto de evaporación. Después de salir de la última cámara, el agua de mar que aún fluye por los tubos pasa a un calentador de salmuera, que se encuentra conectado a una fuente de calor externa, para que su temperatura se eleve antes de ser devuelta a la primera cámara de evaporación. Esto, aunado a la baja presión en la cámara, disminuye el tiempo de evaporación.

En el final de la planta, el agua de mar fría se lleva adentro de la misma y la caliente se rechaza al mar.

En la Figura II.20 se muestra un diagrama de flujo de una planta de este tipo.

- Destilación de efectos múltiples

Este proceso de conversión de agua de mar ha ido tomando cada vez mayor fuerza, en comparación con la destilación de cámaras múltiples. Está basado, principalmente, en el proceso de la película de vapor cayendo sobre los tubos evaporadores.

El principio de este proceso, tal y como se muestra esquemáticamente en la Figura II.21, es que el vapor generado en el primer efecto (de evaporación) es condensado en el segundo efecto, transmitiendo calor y, por consiguiente, evaporando más agua, consiguiendo un mayor caudal de agua destilada. Asimismo, el vapor del segundo efecto se condensa en el tercero y así sucesivamente. La gran diferencia con la Destilación de Cámaras Múltiples es que se pueden alcanzar coeficientes de transferencia

de calor mucho más altos, con un considerable ahorro en el área de transferencia de calor. Además, no se necesita grandes cantidades de salmuera de recirculación, con el subsecuente ahorro de costos de instalación.

En términos generales, el vapor producido en un primer evaporador, de una serie de ellos, se utiliza como fuente de calor del siguiente evaporador. La presión en éste se disminuye para que la solución ebulle con el calor del vapor suministrado (bajo el principio de que a menor presión el agua hierve a menor temperatura). Como se observa en la Figura II.22, en la primera etapa el agua de mar es evaporada a una presión atmosférica o inclusive mayor. Conforme este vapor pasa a través de las bobinas o condensadores, se enfría y condensa como agua destilada. En el proceso de condensado, el vapor proporciona calor y evapora agua de mar en esa cámara, y así sucesivamente a través de una serie de éstas. Este proceso es el usado esencialmente en instalaciones marinas para proveer de agua a calderas.

II.5 Destilación solar

La destilación solar utiliza, al igual que los otros procesos de desalación, la modalidad evaporación-condensación. Es una técnica que no requiere energía de ningún tipo, sino solamente la proveniente del sol. Con este proceso se puede obtener un agua libre de sales a partir de cualquier tipo de agua, y se pueden llegar a obtener caudales considerables hasta de 45 m³/día, o más, dependiendo de la localización geográfica de la planta.

Este tipo de destilación es usada en todos aquellos lugares donde halla una gran cantidad de radiación solar y donde el combustible y la energía eléctrica son costosas. Su extrema confiabilidad y facilidad de montaje la hacen aceptable y factible para aquellos países en desarrollo.

II.5.1 Principios de la destilación solar

El proceso está basado en el "efecto de invernadero", donde el vidrio u otro material transparente tiene la propiedad de transmitir la radiación solar de onda corta que incide sobre él, calentando cualquier cosa que se encuentre debajo. Sin embargo, son pocas las ondas de calor que son rechazadas o reirradiadas a través del vidrio, por lo que en el interior se mantiene una temperatura constante.

El mecanismo de radiación solar a través de un vidrio se muestra esquemáticamente en la Figura II.23. Como se puede observar, la gran parte de los rayos solares se transmiten por el vidrio. La ganancia neta de calor, expresada como un porcentaje de la radiación incidente, está dada en la Figura II.24. Así, para ángulos de incidencia de hasta 35°, la ganancia total de calor es del orden del 85% de la radiación incidente. Geográficamente, las áreas de aplicabilidad de la destilación solar se encuentran en una franja de latitudes de 35°N al 35°S (dicha franja incluye a los grandes zonas áridas del planeta). Aún dentro de este rango de latitudes hay una gran variedad de intensidades solares. El Cuadro II.3 muestra los promedios mensuales de radiación solar para algunas localidades en donde se ha medido este fenómeno, junto con algún sistema de destilación solar.

La Figura II.25 muestra el corte de un destilador solar. En operación, la radiación solar eleva la temperatura de la tina de agua marina (o salobre) y la evaporación comienza cuando dicha agua marina alcanza una temperatura de entre 50-60°C. Debido a que el techo es transparente a la radiación solar, su temperatura se mantiene por debajo de la temperatura de saturación de la mezcla de aire y vapor de agua en el interior, por lo que dicho vapor empieza a condensarse en la parte inferior del techo. El condensado toma forma de gotas y, debido a las condiciones mojadas que se forman en la superficie y a la pendiente, dichas gotas corren hacia los canales de recolección de agua. El modo normal de operación es permitir la evaporación de la salmuera hasta una concentración del doble de la inicial, drenar esta salmuera y volver a llenar la tina de evaporación. En la gran mayoría de las plantas de destilación solar en el mundo, esto se lleva a cabo de tres a siete días, dependiendo de la profundidad de la tina y de la insolación.

Es conveniente hacer mención que en muchos lugares se ofrecen instalaciones económicas fabricadas de materiales ligeros y no costosos. Según Howe y Fleimat (8), se ha confirmado en la práctica que no existe sustituto para el vidrio y una bien soportada estructura, si el fin perseguido es una planta con vida larga, confiable y con facilidad de mantenimiento. El hecho de tener un techo de material plástico confirma la teoría de que estos materiales, con el intenso calor, se cristalizan, pierden cristalinidad y se opacan, impidiendo la libre transmisión de la radiación solar. Por otro lado, se forman pequeñas "zonas secas" en el interior del vidrio, por donde no puede correr el agua, en consecuencia se empiezan a desarrollar pequeñas incrustaciones de sal.

II.5.2 Rendimiento de un sistema de destilación solar

El rendimiento teórico de la destilación solar está en función directa con la insolación y pérdidas de transmisión de calor. Los resultados teóricos de los análisis están esquematizados en la Figura II.26, en la cual se grafican los gastos de un sistema de destilación solar y la insolación con las pérdidas producidas como parámetro de relación. Se puede ver que el efecto de dichas pérdidas "hb" está bastante marcado en una insolación alta. Por ejemplo, a 300 W, con una reducción en "hb" de 5.7 a 1 W/m²°C, dará un incremento en el gasto (expresado éste como unitario por metro cuadrado y por día, representando cada unidad 1 gal / día / 10 ft²) en un 28%.

Sin embargo, ha sido posible una comparación práctica en los rendimientos de varias instalaciones de destilación solar. De esta manera, los resultados obtenidos en varios años de medición continua se graficaron en la Figura II.27. Como se puede observar en dicha figura, las gráficas se mostraron de manera parabólica ascendente. Las curvas de las instalaciones en Islas Aldabra (Océano Indico), Florida (E.U.A.) y Syri (Grecia), son bastante parecidas, debido principalmente a que son sistemas de tipo tina fija y la de Coober Pedy (Australia) es de tipo continua.

El gasto de agua destilada está determinado por la intensidad de radiación solar y el área cubierta. El Cuadro II.4 muestra características de construcción y funcionamiento para varias instalaciones de destilación solar en el mundo.

II.6 Congelamiento

El fenómeno del congelamiento de una solución salina causa que las moléculas del agua se vayan aglomerando formando cristales, dejando atrás una salmuera concentrada. Al contrario que en la destilación, donde a la masa de agua se le incorpora cierta cantidad de calor para evaporarla, en el congelamiento se le retira todo calor. Un método comercial actual de congelamiento consiste en utilizar un refrigerante como el gas butano, el cual es evaporado en contacto directo con el agua marina, removiendo así el calor latente de cristalización.

II.6.1 Procesos físicos en el congelamiento

El influente de agua marina o salobre es preenfriada por un intercambio de calor con los flujos de agua producto y salmuera de desecho. Es entonces cuando el agua entra a un congelador donde el gas butano líquido es burbujead dentro del seno de agua marina. En este momento y debido a la diferencia de

temperaturas, el gas se evapora, disminuyendo considerablemente la temperatura del agua. En consecuencia, se empiezan a formar cristales de agua desalada en una masa de agua con una concentración cada vez mayor de sales. Con este procedimiento, aproximadamente una mitad del volumen de agua se congela. Por último, la masa de hielo se recoge y se bombea a un licuificador. En éste, los hielos son lavados y se compactan formando una masa porosa de hielo. Esta "cama" de hielo se eleva por medio del flujo de agua salada que corre por debajo de ella. El vapor de butano, conteniendo el calor removido del hielo, se comprime por medio de un dispositivo y es introducido en el licuificador, donde se condensa con el hielo. De esta manera el calor es devuelto y el hielo derretido. Sin embargo, ahora el gas butano y el agua producto están mezclados. Esta mezcla de líquidos pasa a través de un decantador donde son separados.

De este decantador, el agua producto abandona el proceso y el gas butano líquido se recicla de nuevo al congelador. El vapor de butano que no fue requerido para derretir el hielo es comprimido por un compresor secundario y es condensado en el dispositivo dispuesto para tal efecto, el cual es enfriado por el agua marina del influente y, posteriormente, reciclado al congelador.

Este proceso se ilustra en la **Figura II.28**.

II.7 Electrodiálisis y electrodiálisis inversa

II.7.1 Electrodiálisis

El proceso de electrodiálisis es una operación en la que se lleva a cabo una separación parcial de los componentes de una solución iónica y que es inducida por un flujo de corriente eléctrica. Esta separación es efectuada por la disposición de una o varias capas de material en el cual el transporte del número de iones difiere de los valores que prevalecen en la solución en cualquier lado de dicha capa.

La electrodiálisis puede ser clasificada, junto con la ósmosis inversa, como un método de "transporte selectivo". En estos esquemas de separación la sal es rechazada del solvente (el agua) a través de una barrera física, sin ningún cambio en el estado de cualquier componente del sistema. Por otro lado, en los procesos como destilación y congelamiento se depende del cambio de estado del solvente para alcanzar la separación requerida.

Los métodos de separación que se basan en el cambio de estado involucran un alto grado de recirculación de energía en el sistema, porque la iniciación de éste requiere de una forma de calor de vaporización del agua. En general, esta energía es muchas veces mayor que la energía teórica para separar la sal del solvente y debe ser recuperada y reusada para hacer el proceso práctico. Las pérdidas e ineficiencias del sistema tienden a ser proporcionales a la cantidad de circulación de energía y, aún en una primera aproximación, la energía requerida para operar un sistema de destilación será una fracción del calor de vaporización del solvente e independiente de la cantidad de sales contenidas en éste.

En cambio y por las condiciones teóricas de la electrodiálisis, este proceso remueve hasta el 99% de los minerales disueltos totales y recupera hasta el 94% del agua a un costo de operación sumamente bajo. Actualmente hay más de 2,000 plantas instaladas produciendo más de 150 millones de galones diarios de agua de buena calidad.

II.7.2 Generalidades del proceso de electrodiálisis

Este proceso de desalinización se basa en el principio bastante conocido de que las sales en solución acuosa se disocian en iones positivos (cationes) y en iones negativos (aniones), y que al pasarle una corriente eléctrica continua a dicha solución mediante dos electrodos, los iones se orientan hacia los polos opuestos, respectivamente.

Utilizando membranas selectivas semipermeables (al igual que en la ósmosis inversa) y los dispositivos hidráulicos y electromecánicos apropiados, se ha creado un equipo de desalación que permite desmineralizar el agua salina, al separarla en dos flujos principales: uno de menor contenido salino, en comparación con el agua de alimentación, denominada agua desalada o agua producto, y otro, de mayor contenido salino, denominada agua concentrada, salmuera o agua de desecho.

Si se aplica un potencial de corriente continua a una solución de cloruro de sodio disuelto en agua, mediante la inserción de dos electrodos en la solución, los cationes se moverán a nivel molecular hacia el electrodo negativo o cátodo, y los aniones hacia el electrodo positivo o ánodo. En la Figura II.29-A se muestra un recipiente en el que tenemos una solución de cloruro de sodio disuelto en agua. Los cationes (Na^+) y los aniones (Cl^-) en estas condiciones se mueven al azar. En la Figura II.29-B se muestra al mismo recipiente con la misma solución, en el que se ha establecido un potencial de corriente

directa en la solución. En estas condiciones los aniones se mueven hacia el electrodo positivo y los cationes hacia el electrodo negativo.

II.7.3 Membranas aniónicas y catiónicas

El fenómeno de orientación y movimiento de iones se puede aprovechar si se dispone de barreras adecuadas para aislar la zona purificada, en este caso la parte central de la Figura II.29-C, de modo que se evite el remezclado. Las membranas catiónicas permiten el paso de sólo los cationes (iones con carga positiva) y las aniónicas permiten el paso sólo de los aniones (iones con carga negativa).

Por lo tanto, la introducción de una membrana catiónica y una membrana aniónica en una solución salina para formar compartimentos de agua (ver Figura II.29-D), y considerando que el agua fluye continuamente, producirá la desmineralización del compartimento o zona central. En la práctica las membranas se distinguen por su color, la aniónica es blanca y la catiónica es ámbar. Además, cada membrana está marcada con las palabras "anión" o "catión", según sea el caso.

En la unidad de tres celdas o cámaras mostradas en las dos figuras anteriores, 1 es el ánodo, 2 es la membrana aniónica, 3 es la membrana catiónica y 4 es el cátodo. En la primera figura no hay flujo de corriente, de modo que los iones se mueven al azar en sus respectivos compartimentos. En la segunda figura el establecimiento de un potencial de corriente eléctrica directa les da a estos iones una orientación y movilidad: los cationes (Na^+) se mueven hacia el cátodo y los aniones (Cl^-) hacia el ánodo. De las figuras se observa que ocurre lo siguiente:

- a) El Na^+ del compartimento A no puede pasar a través de la membrana aniónica (2) al compartimento B.
- b) El Cl^- del compartimento A reacciona en el ánodo (1) para dar cloro gaseoso.
- c) El Na^+ del compartimento B pasa a través de la membrana catiónica (3) al compartimento C.
- d) El Cl^- del compartimento B pasa a través de la membrana aniónica (2) al compartimento A.
- e) El Na^+ del compartimento C reacciona en el cátodo para dar hidrógeno gaseoso e iones hidróxidos (OH^-).

f) El Cl⁻ del compartimento C no puede pasar a través de la membrana catiónica (3) al compartimento B.

Puede verse así el efecto conjunto ha sido una desmineralización del compartimento central.

II.7.4 Polarización

Al contrario de la ósmosis inversa, la polarización es un factor que acarrea pocos problemas en la electrodiálisis, sin embargo juega un papel muy importante en los cálculos básicos de diseño de un sistema con este proceso. En un estado fijo, el arribo de la sal a la interfase de intercambio de iones de la membrana está balanceado por su remoción, la cual depende del flujo de corriente y de la diferencia en el número de transporte en dicha interfase. Relacionando estos dos fenómenos y aproximando el gradiente de la capa de concentración dado por "(Ci-Cim)/d" nos conduce a la siguiente expresión para una membrana permeable catiónica

$$\frac{i}{n^{\circ}F} = \frac{-D_{i+}(C_i - C_{im})}{\delta} (n_{i(+)\infty} - n_{i(+)}) \quad \dots 1$$

Si "Cm" se aproxima a cero, la densidad de corriente se aproxima a un valor límite dado por:

$$i_{max} = \frac{n^{\circ}FD_{i+}C_i}{n_{i(+)\infty} - n_{i(+)}} \left(\frac{1}{\delta}\right) \quad \dots 2$$

En la práctica, mucha menos corriente se usa, ya que, cuando "Cim" se aproxima a cero, se empiezan a formar iones hidrógeno e hidróxido, los cuales conducen una cantidad apreciable de corriente. Así, la polarización está limitada a un valor razonable controlando la densidad de corriente a una concentración preestablecida en el flujo diluido, a través de canales de flujo estrechos, velocidades altas y mecanismos de turbulencia.

II.7.5 Requerimientos de energía y fuerza

Los requerimientos de energía, como una función de la remoción de sal, pueden ser calculados aplicando las leyes de Faraday y Ohm. En electrodiálisis, la primera ley está utilizada para determinar la relación entre el flujo de corriente y la transferencia de electrolitos a través de la membrana.

$$N_d Q_d \Delta N_i^o = \frac{\eta I N_d}{F} \quad \dots 3$$

donde "Nd" es el número de compartimentos de flujo diluido, "Qd" es el gasto volumétrico en un compartimento de agua desalada, "I" es la corriente, "η" es la eficiencia, "Ni°" son los equivalentes electroquímicos por unidad de volumen y "F" la constante de Faraday. La capacidad de una instalación de membrana está regulada por la corriente, pares de membranas y la eficiencia de la corriente.

De acuerdo a la ley de Ohm, la fuerza requerida está dada por el producto del cuadrado de la corriente, "I" y la resistencia eléctrica del paquete de membranas, "Rs", esto es:

$$P = I^2 R_s = R_s \left[\frac{Q_d \Delta N_i^o F}{\eta} \right]^2 \quad \dots 4$$

El requerimiento de energía puede ser derivado de las ecuaciones 2 y 3 de tal manera que la energía consumida por equivalente transferido es:

$$E = \frac{P}{Q_d \Delta N_i^o} = \frac{I R_s F}{\eta N_d} \quad \dots 5$$

Esta ecuación muestra que la energía por unidad equivalente de desmineralización se incrementa con la corriente.

II.7.6 Método de cálculo

Los requerimientos de energía calculados por medio de las ecuaciones 4 y 5 están basados en la resistencia eléctrica del paquete de membranas "Rs". Frecuentemente, el diseño de un sistema de electrodiálisis involucra la obtención de datos provenientes de un laboratorio o planta piloto, a determinadas condiciones de alimentación, calidad de agua y concentrado, entre otros. En este caso, es necesario correlacionar la resistencia y densidad de corriente con la concentración de la

solución y el gasto. Mason y Kirkham (1959) y Mintz (1963) han presentado procedimientos de diseño para tal fin. El último asumió, como una primera aproximación, que la resistencia eléctrica de un par de celdas "Rp" está completamente controlada de manera inversamente proporcional por la concentración en el flujo del compartimento de agua desalada. Esto es,

$$R_p = \frac{B}{N_d^{\circ}} \quad \dots 6$$

Donde "Rp" es la resistencia por área de la celda (ohm-cm²) de cada unidad de área del par de celdas, y "B" es una constante empírica. Si la ley de Ohm es substituida en la ecuación 3, expresada en forma diferencial, se puede establecer la siguiente relación entre la la transferencia de sales "QdNd" y el número de equivalentes eléctricos:

$$-Q_d dN_d^{\circ} = \frac{\eta E_p dA}{R_p F} \quad \dots 7$$

En esta ecuación, "Ep" es el voltaje del par de celdas, y "A" es el área de membrana; los otros términos ya han sido definidos con anterioridad.

Si se substituye la ecuación 6 en la ecuación 7 e integrando en un área efectiva de membrana "Ap" de un par de celdas y sobre rangos de desalación, se tiene:

$$\frac{\eta E_p}{Q_d F} \int_0^{A_p} dA = -B \int_{N_p^{\circ}}^{N_d^{\circ}} \frac{dN_d^{\circ}}{N_d^{\circ}} \quad \dots 8$$

o

$$\frac{\eta E_p A_p}{Q_d F} = R_p N_d^{\circ} \ln \frac{N_p^{\circ}}{N_d^{\circ}} \quad \dots 9$$

Esta ecuación permite calcular el área efectiva de celda requerida para un rango de concentración del agua de alimentación y un gasto. De la misma forma, se puede determinar la cantidad de desalación posible por unidad de área y de gasto. En cualquier caso, es necesario conocer la eficiencia de la corriente y "RpNd" y seleccionar un voltaje de celda basado en las limitantes de la polarización. Mintz (1963) mostró que

" $E_p/R_p N_d$ " está relacionado con el límite de la densidad de corriente,

$$\frac{E_p}{R_p N_d} = \frac{i_{lim}}{N_d} \quad \dots 10$$

donde " i_{lim} " es el límite de la densidad de corriente debido a la polarización.

El requerimiento de fuerza por par de celdas puede ser calculado resolviendo la ecuación 9 para voltaje y multiplicándola por la corriente obtenida de la ecuación 3,

$$P = \frac{Q_d^2 F^2}{A_p} (N_c - N_p) \left(\frac{R_p N_d}{\eta^2} \right) \ln \frac{N_c}{N_p} \quad \dots 11$$

Así, la cantidad de energía requerida por unidad de volumen de agua producto está dada por el grado de fuerza del volumen de flujo, esto es:

$$E = \frac{P}{Q_d} \quad \dots 12$$

De la misma forma, para una unidad de celdas o torre de membranas, la fuerza requerida total se calculará multiplicando a la ecuación 11 por el número de pares de celdas.

La Figura II.30, representa una unidad de compartimentos múltiples. La letra "A" designa la membrana aniónica, la letra "C" la membrana catiónica, el signo (+) el ánodo y el signo (-) el cátodo.

Una solución salina de iones Na^+ y Cl^- fluye entre las membranas. Al aplicar un potencial de corriente directa, el efecto total será, como se ve, un movimiento de iones desde los compartimentos limitados por una membrana aniónica a la izquierda y una membrana catiónica a la derecha hacia los compartimentos adyacentes. Los compartimentos que pierden sales están diseñados como de desmineralización y los que reciben las sales transferidas como desecho o concentración.

También se puede ver en el dibujo dos compartimentos de electrodos. Cada compartimento de electrodo está limitado por una membrana catiónica y dicho electrodo. En el ánodo tiene lugar una reacción que produce oxígeno y cloro gaseoso; en el cátodo se produce gas hidrógeno e iones hidróxidos (OH⁻).

Un sistema de torres de membranas puede ser seleccionado y ordenado en varias configuraciones dependiendo de la calidad del agua que va a ser tratada y el producto requerido, por ejemplo:

La torre de membranas pueden constar de dos etapas o fases en serie interconectadas interiormente de tal modo que la corriente principal de agua pasa primero a través de la mitad superior de la torre o primera etapa, y luego a través de la mitad inferior o segunda etapa.

El agua salina a tratar se divide en dos corrientes principales antes de entrar en la torre. Una de las corrientes que comienza como agua cruda se transforma en parcialmente desmineralizada cuando pasa a través de la primera etapa, a esta se le llama flujo de dilución, agua desmineralizada o flujo de producción (agua producto).

La otra corriente pasa a través de la torre de la misma manera. Su función, sin embargo, es recoger la sal que se remueve de la corriente desmineralizada. Esta corriente resulta concentrada en sales y se llama corriente de concentrado o corriente de desecho (agua concentrada o salmuera).

II.7.7 Electrodialisis inversa

El sistema de electrodialisis inversa difiere de la electrodialisis "unidireccional" en una forma muy simple, pero importante. En principio opera de forma unidireccional, tal y como en la electrodialisis, pero sólo durante un periodo preestablecido de tiempo (normalmente 20 minutos). Posteriormente cambia la polaridad del campo por medio de un mecanismo automático y opera, durante otro periodo de tiempo igual, de manera inversa. Como se puede observar en la Figura II.31, un compartimento que primeramente estaba concentrando sales, posteriormente lleva agua desmineralizada; y otro, que en principio canalizaba agua sin sales, luego las concentra. Por otro lado, los canales que antes llevaban agua desalada ahora llevarán salmuera, y viceversa. Para que los flujos de agua desalada y de salmuera no se mezclen durante el cambio de polaridad, se disponen válvulas electromagnéticas que concentran

dichos flujos de agua de manera separada. Dichos canales se purgan durante un lapso de 0.5 a 1.5 minutos para limpiar los canales, con el fin de no mezclar agua desalada con salmuera.

Este proceso, al contrario que la electrodiálisis unidireccional, ha permitido que las membranas aniónicas y catiónicas se mantengan más tiempo limpias y, por ende, que los costos de mantenimiento se abatan.

II.8 Consideraciones en un sistema de desalación

La Figura II.32 muestra un diagrama de flujo típico de un sistema de desalación con tratamiento dividido. En casi todos los sistemas, cualesquiera que sea el tipo de proceso en que estén basados, incluyen de alguna manera un tipo de pretratamiento y postratamiento, además, claro está, de la desalación. El nivel de pre y postratamiento dependen de la calidad del agua y de los requerimientos de aplicación de la misma posteriormente. Además, en muchos sistemas se utiliza el tratamiento dividido, esto es, una fracción del agua de alimentación se desvía de la unidad de desalación y es mezclada con el agua producto. El concepto de tratamiento dividido puede disminuir la capacidad requerida de la unidad o unidades de desalación para obtener la tasa de producción deseada y un bajo costo. De esta manera, el agua no queda completamente libre de sales disueltas, que son vitales en el agua para consumo humano.

II.8.1 Pretratamiento

Usualmente se requiere un pretratamiento para proteger al sistema de desalación y para mejorar su funcionamiento. El tipo y grado de pretratamiento dependen de las características del agua de alimentación, proceso (especialmente si se trata de membranas) y parámetros de diseño del sistema. Este pretratamiento puede ser mínimo como cartuchos de filtración en caso de agua de pozo, o más sofisticado, como una coagulación, sedimentación y filtración para un agua superficial.

Frecuentemente el agua de alimentación es acidificada para disminuir su potencial hidrógeno "pH" (normalmente en el uso de membranas de ósmosis inversa de tipo celulósicas). También es común el uso de inhibidores de incrustaciones o reactivos químicos apropiados para reducir la incrustación potencial de carbonatos y sulfatos (como suele suceder en los grandes sistemas de destilación) en los conductos y tuberías del sistema.

El pretratamiento estándar en electrodiálisis incluye el paso del agua de alimentación a través de filtros de cartucho y adición de reactivos químicos. La mayor parte de los sistemas estándar de electrodiálisis inversa adicionan solamente ácido a la corriente concentrada del recilcado en forma intermitente durante la rutina de limpieza.

II.8.2 Sistema de bombeo

El sistema de bombeo eleva la presión del agua de alimentación previamente tratada al nivel requerido para la operación del sistema de desalación. En ósmosis inversa el sistema de bombeo típico descarga una presión de 125 a 400 psi cuando se tienen sólidos disueltos totales bajos; en el caso del agua de mar se aplica una presión mucho mayor (800-1,200 psi). En cambio, los procesos de electrodiálisis y destilación (en todas sus variantes) requieren de un bombeo de baja presión para incrementar la presión del sistema (normalmente de 70 a 90 psi) y así poder permitir una distribución de flujo apropiada a través de los canales de flujo y en las membranas.

II.8.3 Unidad de desalación

Esta unidad contiene el juego de membranas para los procesos de ósmosis inversa, electrodiálisis, electrodiálisis inversa y las cámaras de destilación. Todos estos procesos pueden conformar sistemas de tipo modular, incrementando en muy poco tiempo las unidades de desalación conforme aumenta la demanda de agua desalada, lo que les confiere una gran ventaja sobre los procesos normales o tradicionales de potabilización.

Los sistemas de limpieza para los diferentes procesos normalmente utilizan un flujo de agua con una gran cantidad de productos químicos que pasa a través de todos los compartimentos y conductos, de tal manera que éstos queden limpios de impurezas y pequeñas incrustaciones (tanto en las membranas como en las cámaras de evaporación). Sin embargo y debido a una falta de cuidado en la operación, puede llegar a ser necesario un cambio de membranas o una limpieza más detallada de las cámaras.

II.8.4 Postratamiento

El postratamiento que debe hacerse en un sistema de desalación para un agua destinada a consumo humano comunmente incluye un ajuste del pH (potencial hidrógeno) del agua producto para un control de la corrosión y la adición de un desinfectante para eliminar cualquier organismo patógeno.

La eliminación de gases normalmente se efectúa forzando un gasto de agua a través de una columna empacada de algún material especial. En muchos casos el bióxido de carbono debe removerse para estabilizar el agua en el proceso de ósmosis inversa. En cambio, en los sistemas de ED y EDI este paso no se requiere, debido a que la adición de ácido que elimina el bióxido de carbono se realiza en el pretratamiento. Si hay sulfuro de hidrógeno, la desorción del agua producto se proporciona para eliminar el olor y minimizar la cantidad de desinfectante (cloro, en la mayoría de los casos).

II.8.5 Utilización final del agua producto

La selección del proceso de desalación o de cualquier otro proceso de tratamiento y el de diseño global del sistema depende de la composición y calidad deseadas del agua producto. La facilidad para alcanzar los objetivos requeridos del agua producto depende de la composición del agua de alimentación. Cuando se especifica la utilización de cierto proceso de desalación, todos los objetivos de calidad del agua y no sólo los primarios deben ser conocidos. Es necesario un claro establecimiento de los objetivos para evaluar todos los procesos alternativos, tales como tratamiento dividido, mezclado o combinaciones de procesos.

II.8.6 Disposición del desecho concentrado

Una de las principales consideraciones de diseño y, frecuentemente, una de las partidas a la que mucha atención se le debe prestar, es la disposición del desecho concentrado o salmuera. La corriente del desecho líquido proveniente de las plantas desaladoras es, cuando la factibilidad existe, descargada directamente al mar, ya sea por medio de alguna tubería dispuesta expofeso o por el alcantarillado pluvial, cuando la zona en cuestión tenga uno. El problema se torna más difícil cuando no hay una costa cercana a la zona donde se localiza la planta desaladora. En estos casos es común utilizar lagunas de evaporación y, en segundo término, obtener otro producto como la sal; otra opción es descargar la salmuera al emisor de una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual deberá estar calculada en sus procesos para tal fin. En el primer caso, el hecho de tratar salmueras de desecho por medio de un destilador solar incrementará el caudal de agua destilada, reduciendo el volumen inicial de la salmuera.

CUADRO II.1
PRESIONES OSMOTICAS TIPICAS

COMPUESTO	CONCENTRACION		PRESION OSMOTICA (psia a 25°C)
	(mg/l)	(moles/l)	
NaCl	35,000.00	.60000	398.00
NaCl	1,000.00	.01710	11.40
NaHCO ₃	1,000.00	.01190	12.80
Na ₂ SO ₄	1,000.00	.00705	6.00
MgSO ₄	1,000.00	.00831	3.60
MgCl ₂	1,000.00	.01050	9.70
CaCl ₂	1,000.00	.00900	8.30
Sucrosa	1,000.00	.00292	1.05
Dextrosa	1,000.00	.00555	2.00

FUENTE: Walter, J. Weber, Jr., Physicochemical
Processes for Water Quality Control

CUADRO II.2
SALINIDAD Y PRESION OSMOTICA DE LA SALMUERA
EN FUNCION DE LA RECUPERACION
 (Contenido de sales = 38,000 mg/l)

CONVERSION RECHAZO (%)	SALINIDAD DE LA SALMUERA (ppm SDT)	PRESION OSMOTICA Kg/cm ²
30	54,000	39.0
35	58,000	42.0
40	63,000	45.0
45	69,000	50.0
50	75,000	55.0
55	84,000	60.0

FUENTE: UOP Fluid Systems, Manual Práctico de Osmosis Inversa, Estados Unidos de América, 1989

CUADRO 21.3
VALORES SELECCIONADOS DE RADIACION SOLAR

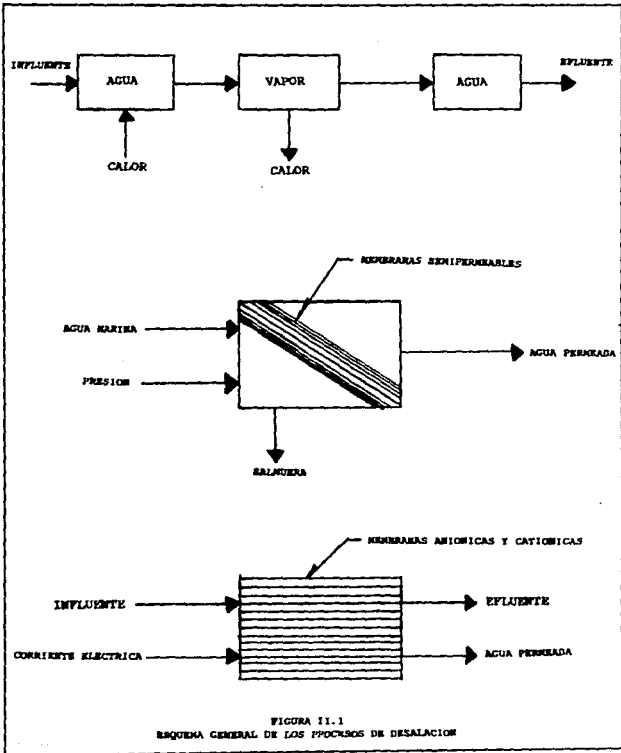
LOCALIDAD	LAT.	LONG.	ELEV (#)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
Aden	12° 50' N	45° 01' E	4	415	481	541	591	573	530	503	535	541	544	500	464	516
Australia																
Alice Springs	23° 48' S	133° 53' E	546	666	620	556	466	369	337	361	460	551	592	623	641	518
Dry Creek, SA	34° 50' S	138° 35' E	4	691	801	487	426	233	197	209	286	397	479	600	662	439
Ceylán																
Batticaloa	7° 43' N	81° 42' E	3	640	510	550	540	540	510	520	530	540	500	470	420	507
Francia																
Montpellier	43° 35' N	3° 50' E		150	230	300	420	480	600	640	490	380	240	170	120	352
Grecia																
Acanes	37° 58' N	25° 43' E	107	180	276	334	437	516	577	572	498	396	276	187	161	369
India																
Barode	22° 15' N	73° 15' E		450	520	580	650	690	600	450	400	540	470	480	420	521
Kenia																
Nairobi	1° 18' S	36° 45' E	1709	558	595	559	486	416	397	324	366	486	492	486	522	472
Perú																
Bancayo	12° 02' S	75° 19' W	3315	670	518	576	540	499	491	519	568	597	634	629	596	570
España																
Alicante	37° N	2° 5' E		215	296	405	503	552	588	595	541	443	337	241	190	409
Reino Unido																
Cambridge	52° 13' N	00° 04' E	23	60	102	190	284	398	428	412	320	246	151	67	42	225
Estados Unidos																
Boston	42° 21' N	71° 04' W	102	139	198	293	364	472	499	496	425	341	238	165	119	311
Phoenix	33° 26' N	112° 01' W	102	297	408	521	643	724	740	652	612	568	452	339	280	520
NOTA: Valores en 10 ⁴ cal/m ² /día																
Conversión a W/m ² = Involución (4.83 × 10 ⁻⁵)																

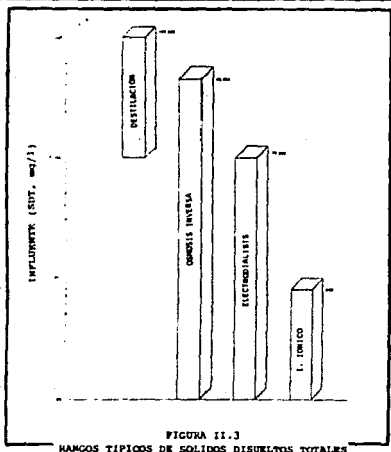
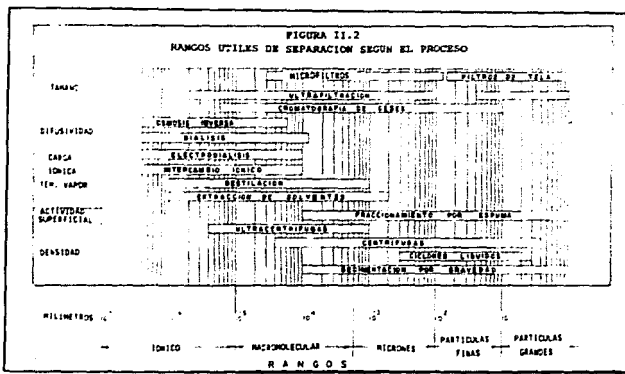
FUENTE: Loef, G., World Distribution of Solar Radiation, Report No. 21,
Engineering Experimental Station, University of Wisconsin, 1966.

CUADRO 11.4
 CARACTERÍSTICAS DE VARIAS PLANTAS DE DESTILACIÓN SOLAR EN EL MUNDO

LOCALIDAD	SUPERFICIE DE TIBA DE AGUA MARINA (m ²)	AÑO DE CONSTRUCCION	GASTO ANUAL PROMEDIO (l/m ² /día)	INSOLACION PROMEDIO (kcal/m ² /día)	M ²
Islas Aldabra (océano Indico)	167	1970	3.80	5,160	250
Andes (Chile, 1300 m.s.n.m.)	4,700	1872	5.76	8,150	395
Patmos (Grecia)	8,667	1967	3.00	----	---
Symi (Grecia)	2,700	1964	2.62	3,743	182
Cooper Pedy (Australia)	3,500	1966	3.22	5,100	246
Muresk (Australia)	416	1936	2.20	5,100	246
Islas Pacífico	465	1966	4.30	6,300	305

FUENTE: PORTEUS, Andrew, Saline Water Distillation Process, Longman,
 Great Britain, 1975





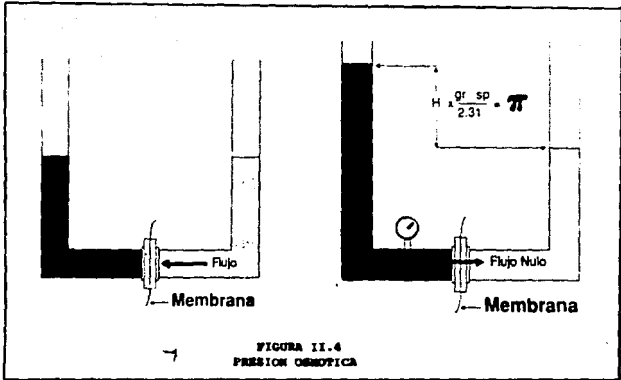


FIGURA II.4
PRESION OSMOTICA

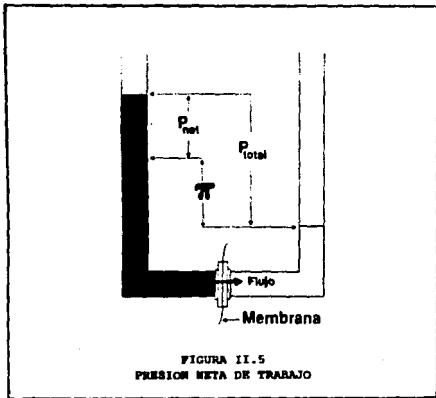


FIGURA II.5
PRESION NETA DE TRABAJO

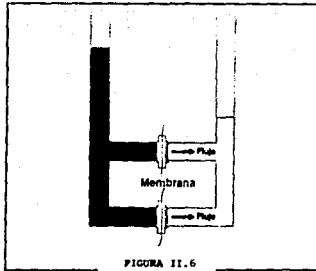


FIGURA II.6
AREA DE MEMBRANA

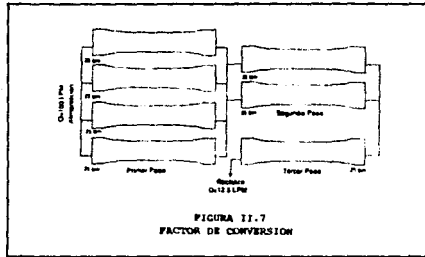


FIGURA II.7
FACTOR DE CONVERSION

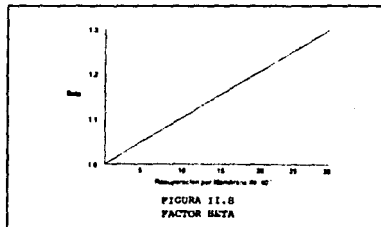
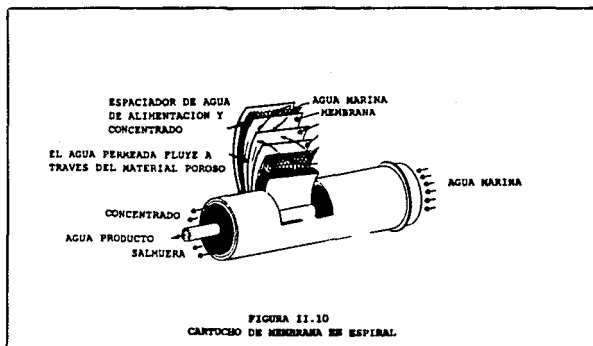
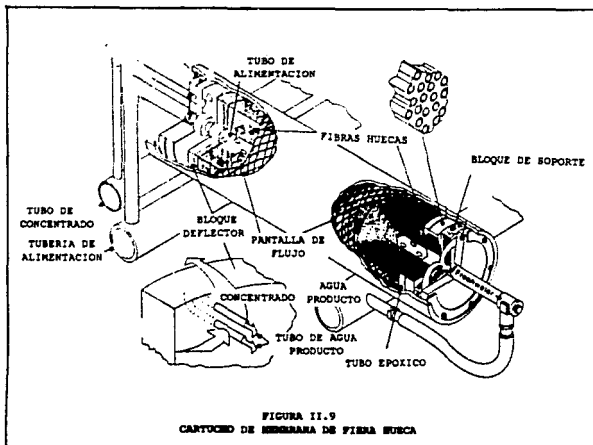
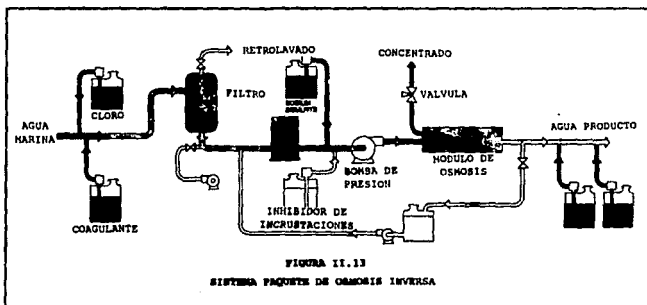
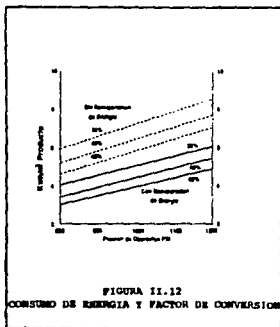
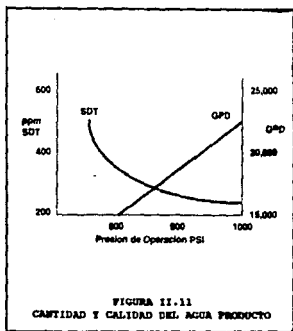
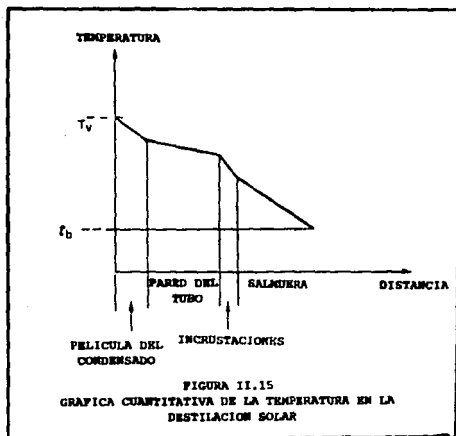
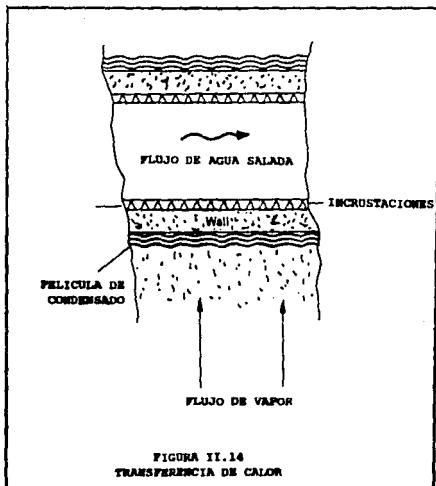
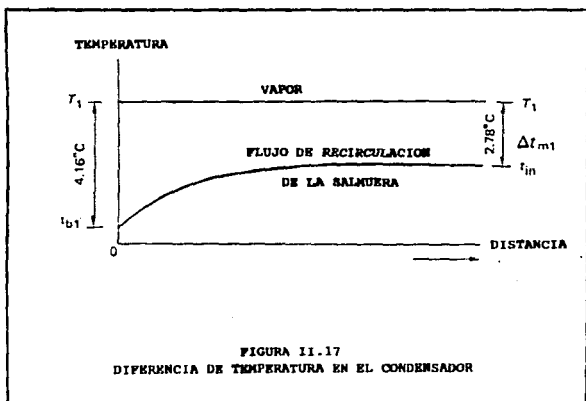
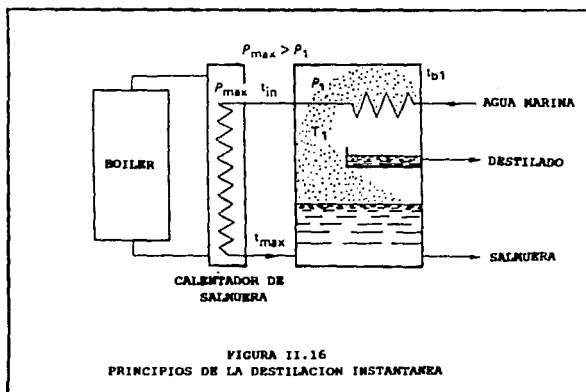


FIGURA II.8
FACTOR BATA









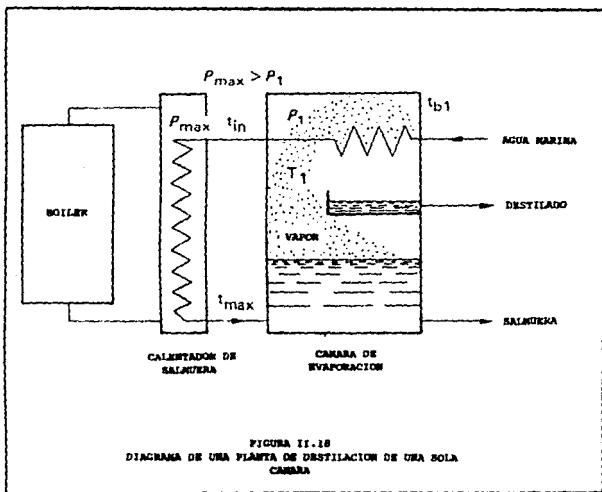
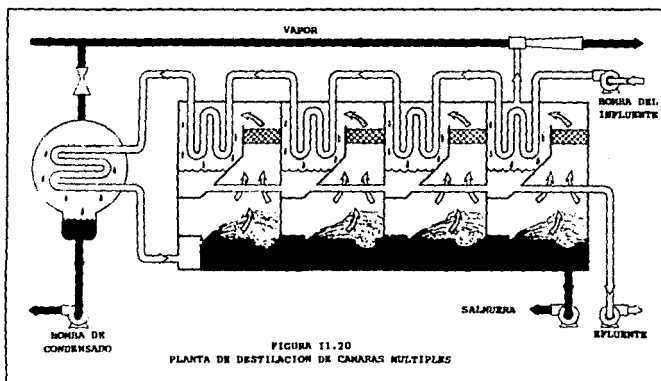
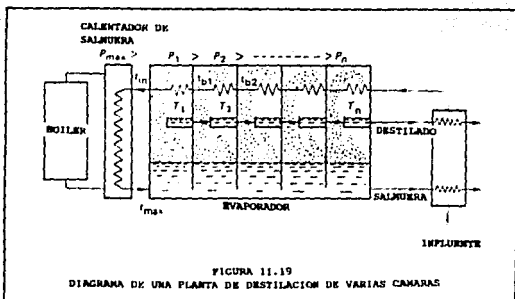
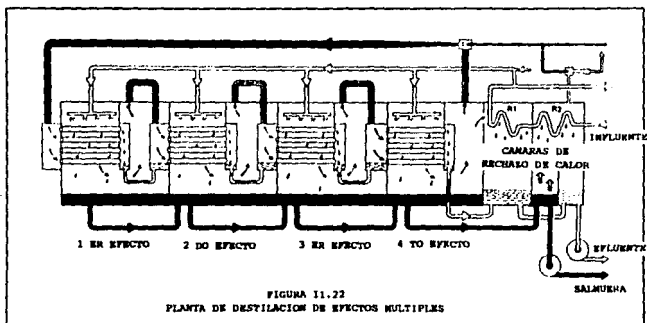
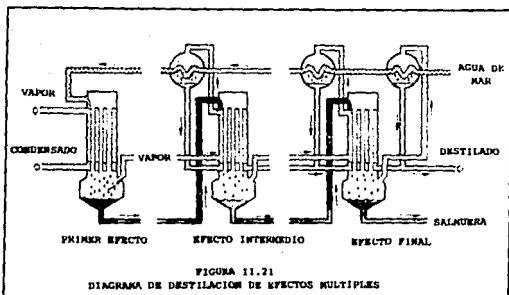
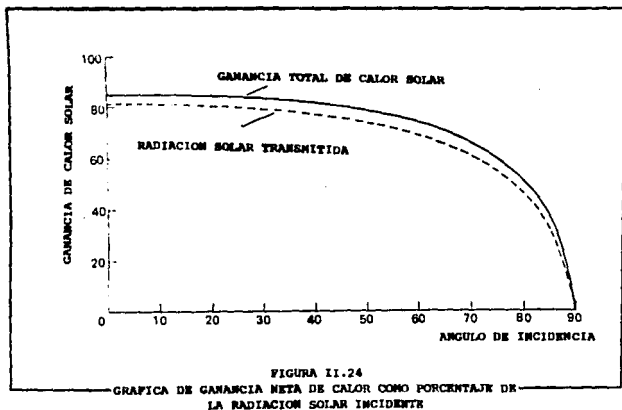
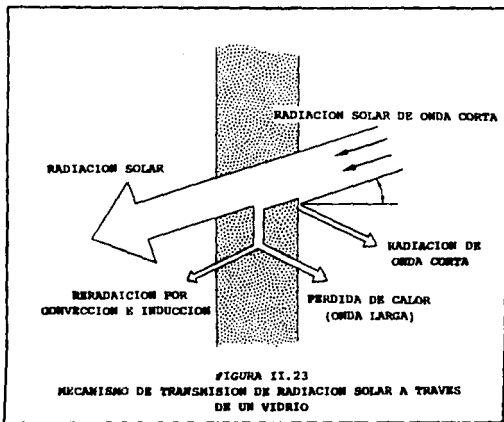


FIGURA II.18
 DIAGRAMA DE UNA PLANTA DE DESTILACION DE UNA SOLA
 CAMARA







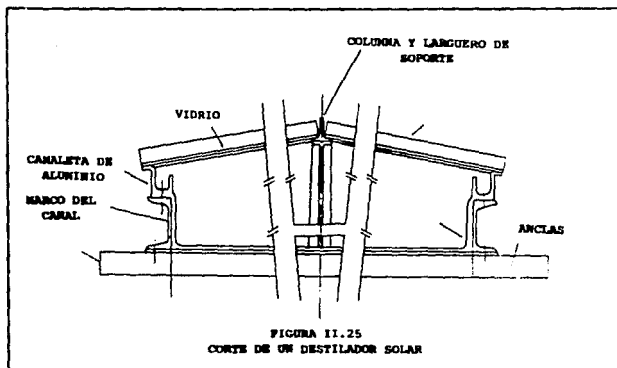


FIGURA 11.25
CORTE DE UN DESTILADOR SOLAR

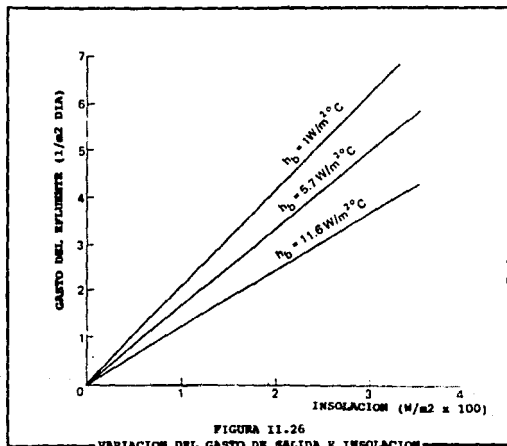


FIGURA 11.26
VARIACION DEL GASTO DE SALIDA E INSOLACION

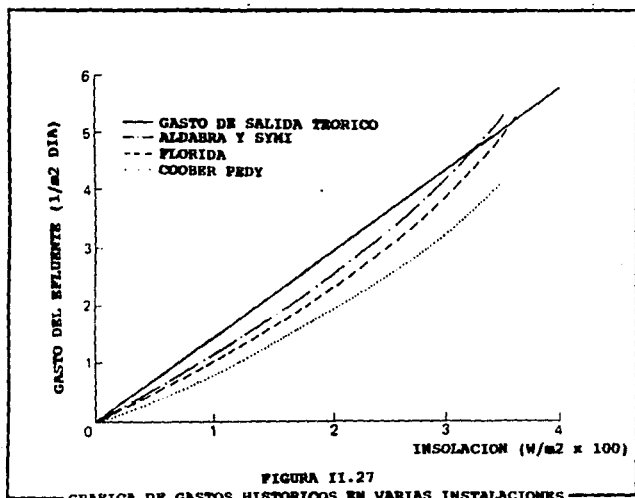


FIGURA II.27

GRAFICA DE GASTOS HISTORICOS EN VARIAS INSTALACIONES DE DESTILACION SOLAR

FIGURA II.28
ESQUEMA DEL PROCESO DE CONGELAMIENTO

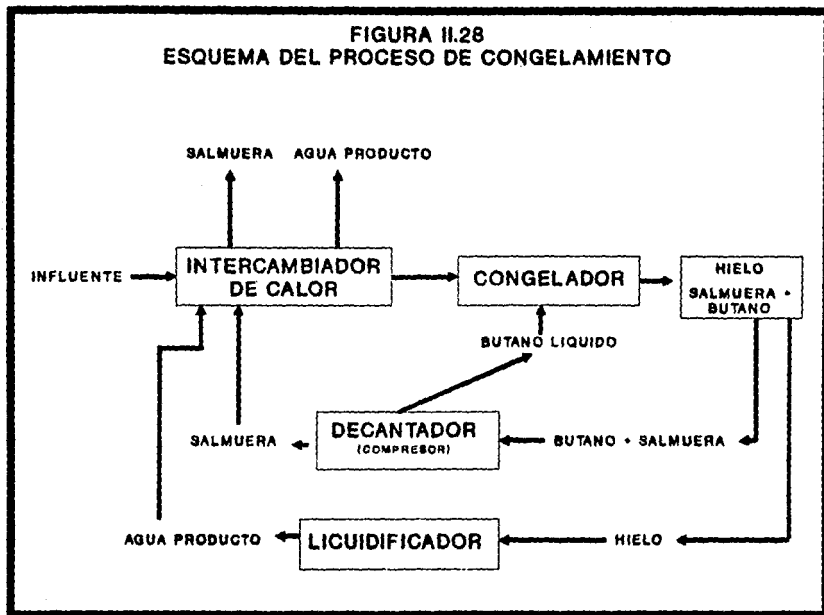
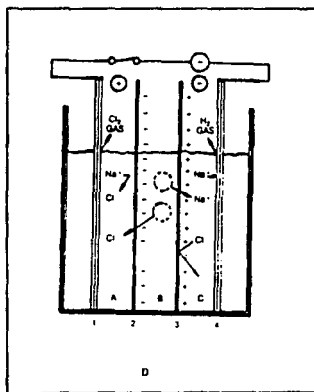
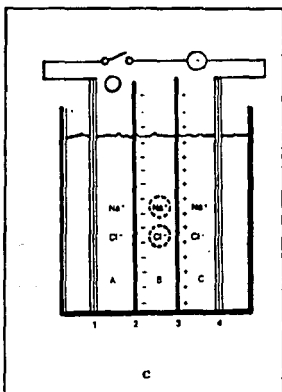
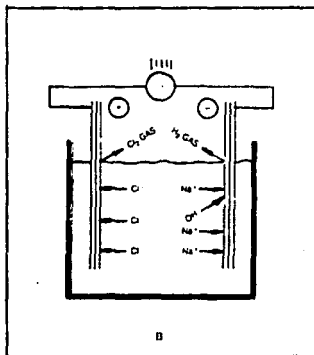
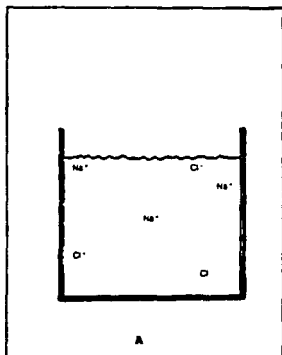


FIGURA II.29
 PROCESO ESQUEMATIZADO DE LA ELECTRODIÁLISIS



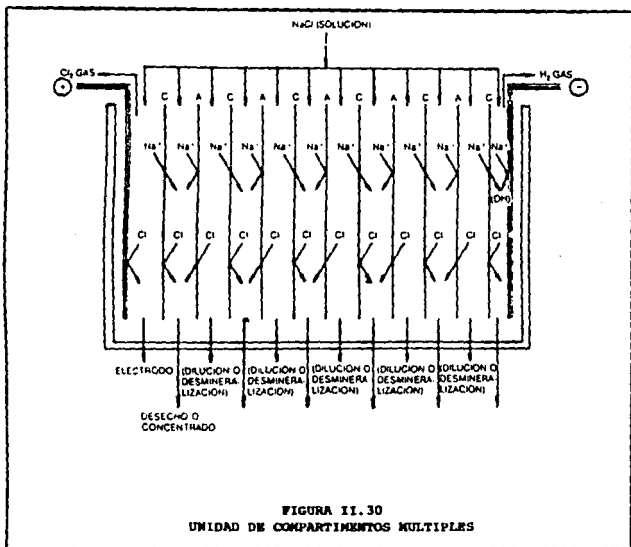
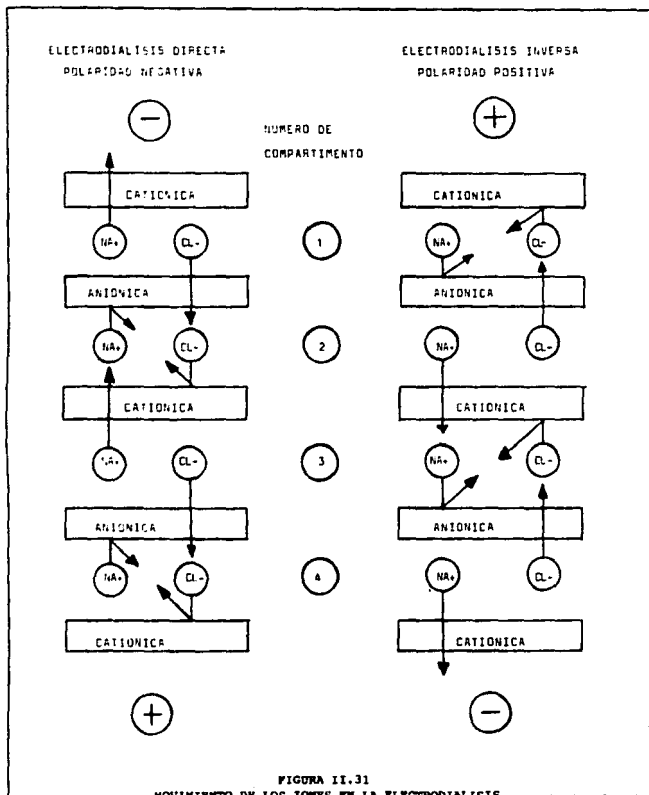
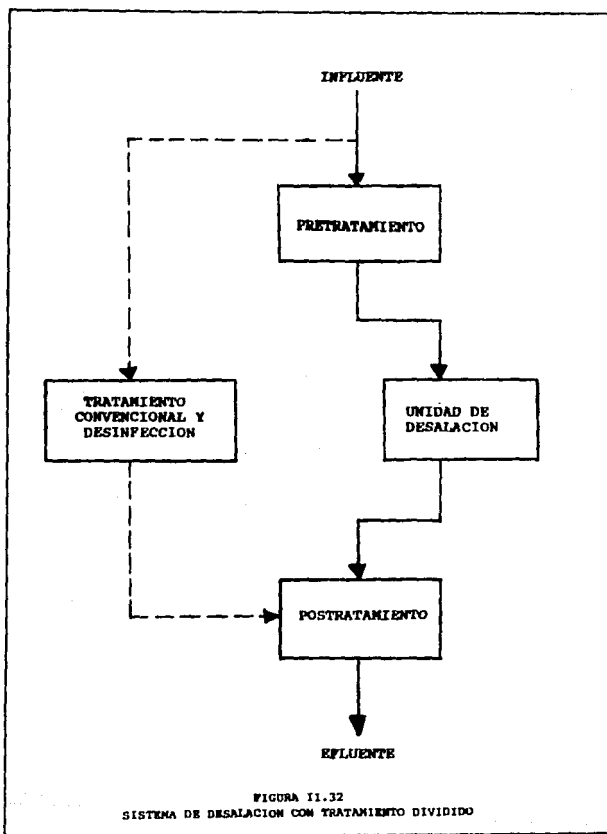


FIGURA II. 30
 UNIDAD DE COMPARTIMENTOS MÚLTIPLES





III. COSTOS DE SUMINISTRO DE
AGUA POTABLE MEDIANTE
DESALADORAS

III. COSTOS DE SUMINISTRO DE AGUA POTABLE MEDIANTE DESALADORAS

III.1 Introducción

En el diseño de un esquema de desalación, ya sea de agua salobre o marina, se deben considerar muchos factores que lo afectan tanto técnica como económicamente, y que podrían asegurar el éxito o el fracaso de todo el proyecto, sin importar el proceso de desalación en particular que se vaya a usar.

En la actualidad se ha acuñado la palabra "termoeconomía" para describir al estudio generalizado de todos los factores que involucra un proyecto de esta naturaleza. De esta manera, un estudio "termoeconómico" sirve para revelar la forma en que las opciones seleccionadas afectan al costo del agua tratada, ya que combina diferentes disciplinas científicas (principalmente termodinámica) y económicas (administración y finanzas) para resaltar las condiciones críticas que determinan el costo de producir agua dulce a partir de agua salada.

La palabra clave en todo estudio económico es "óptimo" y está usada en un sentido técnico limitado para todos los recursos, cuyos costos deben ser definidos con claridad. Un punto importante que debe ser considerado es qué tanto valor debe ser puesto a recursos como agua, combustibles, tierra, mano de obra, materiales, tiempo, etc. Estos puntos, aunque no serán tratados en toda su extensión en este trabajo, por ningún motivo deberán parecer triviales al proyectista.

Los métodos actuales para la determinación de los costos de los recursos usados en una planta desaladora varían de país a país. En algunos, el costo del combustible o de la energía eléctrica puede ser menor o mayor comparado con otros y ser un factor de decisión; también están otros factores como impuestos, mano de obra, etc.

Como puede verse, en todo tipo de proyectos de infraestructura de gran tamaño es evidente que el ingeniero no sólo debe tomar en cuenta la incertidumbre acerca de los costos presentes, sino también una previsión para los cambios en los costos futuros.

III.2 Factores que afectan el costo del agua desalada

Una particularidad de las plantas desaladoras es que el costo de producción de agua dulce, a través de la mayoría de los procesos, es inversamente proporcional al tamaño de la planta, debido a la menor inversión y costos de mantenimiento y operación (y a veces por energía) por unidad de agua dulce producida. Sin embargo, siempre hay un límite a las reducciones que se pueden hacer desde el punto de vista obra civil y de accesibilidad de equipo y es cuando el sistema se torna más económico, es decir, un determinado fabricante de equipo podrá ofrecer su sistema más grande para un volumen de agua deseada. Desde este punto de vista, una producción de agua dulce más grande sólo puede ser asegurada con la instalación de más unidades y por tanto la reducción en el costo se hace más lenta. Una mayor reducción se puede alcanzar mediante la distribución de ciertos costos como lo son la supervisión, facilidades del servicio e impuestos, entre otros.

De esta manera, los costos de desalación, ya sea de procesos de membrana (ósmosis inversa y electrodiálisis) o evaporativos (destilación), pueden variar significativamente dependiendo de los factores a que estén sujetos. Algunos de éstos que afectan los costos de un proyecto de desalación son los que se enuncian a continuación:

- Tipo, tamaño y localización de la planta desaladora
- Fuente, calidad y temperatura del agua cruda y grado de pretratamiento requerido
- Parámetros de calidad en el influente de agua y el grado de tratamiento dividido
- Almacenamiento y tratamiento del agua producto
- Factor de carga anual de la planta
- Costos de construcción y mantenimiento de obra civil
- Costos de mano de obra de operación y mantenimiento
- Costos de productos químicos
- Costo de la energía (electricidad, combustibles)
- Costos de disposición de la salmuera o agua de rechazo
- Costos de reemplazamiento o reposición de membranas
- Requerimientos de garantías y financiamientos

Todos estos factores afectan de manera directa o indirecta a dos tipos de costos presentes en todo tipo de proyecto de infraestructura: costos de inversión y costos de operación y mantenimiento.

Ambos tipos deben ser evaluados siempre que se quiera realizar un proyecto de desalación. A menudo, los costos de operación y mantenimiento exceden a los de inversión ya amortizados, aunque por lo general en los diversos procesos se mantiene una proporción entre los primeros y los segundos. Como se puede ver en el Cuadro III.1, existe una distribución en los costos de inversión, operación y mantenimiento para diversos elementos que conforman al sistema. Claro está que las proporciones que se muestran no son exactas para todas las plantas, pero se mantiene una estrecha relación.

A continuación se describen brevemente los factores más importantes que influyen en la determinación de los costos.

III.2.1 Tamaño de la planta y equipo

Los procesos que estén siendo investigados en relación al tamaño de una planta desaladora que tenga la operación más económica pueden variar mucho de uno a otro. Algunos de éstos, como el caso de la destilación y sus variantes, están diseñados para producir grandes volúmenes de agua dulce, variando desde 3,000 hasta 380,000 m³/día. Un intento de usar uno de estos procesos en una planta para una demanda baja de agua desalada, puede resultar en costos mucho más altos que otros procesos. En estos casos, la experiencia norteamericana dicta que la estimación de los costos, independientemente del proceso de que se trate, deben ser basados en una producción de 3,000 m³/día de agua dulce, manteniendo todos los demás factores constantes. Con esto se cree que es suficientemente grande la producción para alcanzar una operación económica, y basando los estimados en un tamaño de planta definida permitirá una rápida comparación entre varios procesos.

III.2.2 Calidad del influente y del agua producto

Algunos procesos pueden estar sujetos a variaciones que pueda haber en el agua de alimentación que deban tratarse y, ocasionalmente, en el agua producto. Unos, como los evaporativos, pueden utilizar agua de mar como agua de alimentación y el grado de pretratamiento puede ser muy sencillo, limitándose a un proceso de sedimentación y de filtración; otros, como los basados en membranas, deben ser adaptados, por lo general pero no rigurosamente, a concentraciones de sales menores a las de agua

de mar (en la actualidad este punto ya no es tan importante, debido a que la tecnología actual ha mejorado en una gran proporción la calidad de las membranas, siendo éstas aptas tanto para agua salobre como marina). Sin embargo, los influentes de estos procesos también requieren de un pretratamiento para su acondicionamiento físico (sedimentación y filtración) y químico (adición de inhibidores de incrustación y ajuste del potencial hidrógeno). Por lo tanto, una mala selección del proceso para tratar un tipo de agua para la cual no ha sido diseñado específicamente y una baja eficiencia del pretratamiento, puede traer como consecuencia altos costos de operación y mantenimiento con un desgaste anormal y excesivo de los diferentes elementos del sistema. Esta es la razón por la cual se hace énfasis en el conocimiento de la calidad del agua por tratar, su pretratamiento y en la calidad deseada del efluente.

III.2.3 Consumo de energía

El consumo de energía está en función directa con el grado de calidad del influente y del efluente que se desea, y su costo varía de un país a otro e inclusive de localidad en localidad, por lo que, dependiendo del proceso, será un factor determinante en los costos de operación y mantenimiento. Por energía no sólo se entiende a la eléctrica, sino también a aquella producida por combustibles. Aún cuando parezca, a simple vista, que un proceso es más económico que otro en cuestión de costos de inversión, el costo de mantener operando un sistema con requerimientos fuertes de cualquier tipo de energía (eléctrica o calorífica), cuando el costo de ésta es alto, puede bastar para que el proceso de desalación seleccionado no resulte tan económico como fue planeado.

III.2.4 Costo de inversión

Este varía de un proceso a otro y de la calidad de agua de alimentación y de producto. La experiencia indica que un factor decisivo en la selección de un proceso es la producción de agua por día y la calidad del influente. Es recomendable establecer contacto con diferentes proveedores y casas fabricantes de equipo de desalación. Por lo general uno de los requisitos que se pide para cotizar equipo es el reporte de calidad de agua tanto de la que se utilizará como influente como la deseada en el agua producto.

III.2.5 Costo de agentes químicos

Entre éstos se encuentran los de uso continuo y los de uso esporádico. Los más importantes en cuanto al costo son los primeros y su precio puede variar en función del tipo de agente químico, de la localidad de que se trate y, principalmente, de su disponibilidad en el mercado.

Algunos procesos no requieren grandes cantidades de agentes químicos, sin embargo, su uso estará regido por el grado de pretratamiento y postratamiento que necesite un proceso en particular.

III.2.6 Mano de obra

Este concepto está en función de la cantidad de operarios, supervisores, encargados y obreros que conforman el personal de una planta, así como también del tamaño y tecnología empleada en ella.

Es indispensable y drásticamente importante el hecho de proveer una capacitación especializada a toda la mano de obra que labore en una planta de desalación, ya que el equipo, aún cuando pueda ser de operación sencilla, necesita ser conocido en toda su extensión.

III.2.7 Mantenimiento y reparación

El valor de este concepto representa un porcentaje entre 2 y 8% del costo de inversión, dependiendo de la capacidad del sistema y del tipo de proceso que utilice. Además, es bien conocido el hecho de que una operación inadecuada e ineficiente que rebase las bases de diseño de la planta, harán que se necesite un mayor grado de mantenimiento y reparación, encareciendo la operación del sistema.

III.2.8 Disposición de la salmuera de desecho

Este problema no puede ser considerado en una base general ya que involucra la localización exacta de la planta. Para aquellas que se encuentren junto a la costa, el costo por este concepto dependerá del bombeo y línea de presión hasta el mar. En otros casos y específicamente cuando se está a grandes distancias de la costa, el desecho de la salmuera puede ser un problema de difícil solución. En ciertos casos, su disposición en arroyos que fluyen hacia el mar o bombearla al subsuelo puede ocasionar severos problemas. La selección de una determinada

área donde disponer la salmuera acarrearía un costo considerable pero no puede determinarse antes de la exacta localización de la planta.

De esta manera, el costo mínimo de producción total es obtenido diseñando la combinación óptima de costos de inversión y de operación y mantenimiento.

Los procesos de desalación se han venido utilizando cada vez más en México. Sin embargo, debido a su tecnología y altos costos comparados con los métodos convencionales de captación y potabilización, no han tenido la misma aplicación que en otros países. Por otro lado, las plantas instaladas en México tienen en la gran mayoría de las veces fines diferentes al de abastecimiento de agua a poblaciones, frecuentemente con requerimientos de calidad de agua muy superiores al de consumo humano y los reportes sobre sus costos de operación no son fácilmente accesibles. Asimismo, la gran dificultad que reside en calcular los costos por inversión, operación y mantenimiento para una planta de desalación en particular hace difícil esta tarea, siendo que de antemano no se conocen ciertos datos básicos de diseño, entre los cuales se pueden mencionar calidad de agua del influente, uso y calidad deseada del efluente y volumen por abastecer, entre otros. Son estas las razones por las cuales los costos que se reportan no son representativos para el fin que se persigue en este trabajo, por lo que se han tomado los que reportan la literatura técnica más reciente, los sistemas actuales de información y los estudios realizados para tal efecto.

Es conveniente hacer resaltar, una vez más, la gran importancia de solicitar asesoría a las grandes firmas expertas en la materia, en la inteligencia de poder discernir entre aquellas que realmente nos ayudan y apoyan en nuestro proyecto de las que sólo buscan poder realizar un buen negocio. Al final de este trabajo, en el Anexo A, se proporcionan los datos de los principales fabricantes de equipo de desalación.

Es importante señalar que existen en el mercado una gran cantidad de fabricantes de sistemas de desalación, y que tienen conocimientos sobre los requerimientos de energía dependiendo del modelo. Por lo anterior, es conveniente solicitar información y asesoría sobre sus productos.

III.3 Costos de desalación

En un estudio reciente realizado por la Oficina de Asesoramiento de Tecnología para el Congreso de los Estados Unidos, se revisaron los costos históricos de desalación, tanto

de agua salobre como de mar con los procesos actuales. Los resultados obtenidos en materia de costos se resumieron en tres gráficas que muestran el desarrollo histórico de los costos de desalación, y los que se ilustran en la Figura III.1. Tal y como se puede ver, el costo ha descendido conforme al tiempo, como resultado de los avances tecnológicos y de competencia en el mercado. Las mejoras en la tecnología de membranas para los procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis, así como una mejor eficiencia en el uso de calor en los procesos de destilación, han jugado un papel muy importante en la reducción de los costos de desalación, haciéndolos en muchas ocasiones más atractivos que los métodos convencionales de potabilización de agua.

Como se muestra en la figura anterior, el tratamiento convencional de agua ha sido considerado menos costoso que la desalación. Los costos de este proceso varían desde 1950 hasta 1990 e incluyen costos de inversión, mantenimiento y operación, para plantas con producciones diarias de 3,700 - 18,500 m³ de agua dulce. Es claro que estos costos pueden ser mucho mayores si la planta está siendo operada de manera ineficiente. Es conveniente mencionar que en la figura antes mencionada se han integrado los costos de desalación para los procesos de destilación, ósmosis inversa (para agua salobre y marina), electrodiálisis y para los procesos convencionales de potabilización, mostrando los rangos económicos.

Tal y como se observa en la misma figura, la destilación es el proceso más antiguo, aplicándose desde 1950, aunque sus costos eran excepcionalmente altos (5 dólares/m³). La reducción de sus costos en la década de los sesentas se debió al auge energético a nivel mundial, incrementándose substancialmente a mediados de la década de los setentas. Sin embargo, los costos para este proceso han comenzado a disminuir desde 1983, aproximadamente. Los costos actuales para la destilación fluctúan entre 2.2 y 2.7 dólares/m³, sin embargo estos costos son extremadamente conservadores, siendo que pueden reducirse significativamente, tal y como se menciona posteriormente.

Los costos de la electrodiálisis y la ósmosis inversa (en la desalación de agua salobre) se han estudiado desde 1963. Así también, sus costos, relativamente más bajos que la destilación en sus comienzos, se han reducido conforme a los avances tecnológicos en cuestión de membranas, siendo que para mediados de la década de los ochentas, han sido inclusive menores a los costos de los métodos convencionales de potabilización, fluctuando entre 1.0 y 1.6 dólares/m³. En cambio, la aplicación de la ósmosis inversa para agua marina tuvo sus inicios en los comienzos de los setentas, y sus costos eran extremadamente altos. Sin embargo, los adelantos tecnológicos en las membranas,

han hecho que dichos costos se hayan reducido para los ochentas sustancialmente, siendo inclusive, competitivos con la destilación.

A continuación se reportan los costos de desalación para los cuatro procesos considerados en este trabajo. Estos costos están expresados en dólares norteamericanos de 1989.

III.3.1 Costos de desalación para el proceso de ósmosis inversa

Tal y como se observa en la Figura III.2, los costos de inversión y operación y mantenimiento de la ósmosis inversa dependen de dos factores: capacidad de la planta para los primeros y costo de la energía eléctrica, para los segundos. De la misma forma, el costo total depende de la concentración de sólidos disueltos totales que contenga el influente.

Los costos típicos de desalación para este proceso, para un agua típicamente salobre (SDT=10,000 ppm) con una planta de capacidad 378,000 m³/día y un costo de energía de 0.7 dólares/KWhr (en México el costo actual del KWhr de energía eléctrica es de 0.6 dólares), es aproximadamente 0.85 \$/m³; en cambio, para una planta con influentes marinos (SDT=36000 mg/l), de la misma capacidad y con el mismo costo de la energía eléctrica, el costo total se elevaría a 2.6 \$/m³. Lo anterior representa un incremento del 206%, lo cual indica que es fundamental el conocimiento de la calidad del agua por tratar.

El Cuadro III.2 muestra los costos, tanto de inversión como de operación y mantenimiento para sistemas de ósmosis inversa de agua salobre. Los datos presentados corresponden a plantas bajo este proceso localizadas en el estado de Florida, E.U.A.. Como se puede observar en dicho cuadro, los costos totales por metro cúbico de agua permeada puede variar entre 1.01 y 3.08 dólares/m³, dependiendo de los factores considerados.

III.3.2 Costos de desalación para el proceso de destilación

Como se comentó en el capítulo anterior, del proceso de destilación surgen variantes dependiendo de la forma en que se aproveche el calor suministrado al sistema, en la forma en que se maneje el vapor producido y el flujo de agua destilada. Sin embargo y como menciona la literatura especializada en el tema, los costos dependen casi exclusivamente de dos factores: 1) capacidad requerida de la planta y, 2) del costo de los combustibles empleados. De esta manera, los costos para este proceso varían mucho y, más que nada, han dependido de las condiciones mundiales en cuanto al costo de los energéticos a lo

largo de las décadas. La Figura III.3 muestra los costos tanto de inversión como de operación para una planta bajo este principio. Es digno de hacer mención que las dos gráficas mostradas son de tipo general y no especifican las variaciones respecto a personal de la planta, financiamiento, reemplazo de dispositivos, limpieza, etc..

III.3.3 Costos de desalación para el proceso de congelamiento

El costo del agua dulce proveniente de un sistema de desalación que trabaje bajo el principio de congelamiento aún no ha sido perfectamente establecido, ya que la información básica proviene de plantas de dimensiones pequeñas y en la mayoría de las veces con fines industriales y que conjuntan a este proceso de destilación con otros procesos de otra índole. La información obtenida se refiere a las plantas piloto de Carrier y Struthers, en Wrightsville Beach, Carolina del Norte, de Blaw Knox, en St. Petersburg, Florida, de Colt, en Beloit, Wisconsin, en Estados Unidos y en Eilath, Israel, las cuales tienen una capacidad máxima de producción de 20,000 m³/día.

El rango de costos estimados para el proceso de congelamiento se muestra en la Figura III.4. Dicho rango es irregular, ya que cada compañía realizó, de manera independiente, sus estimaciones, considerando diferentes factores y variantes. Además y como se puede observar, los costos son relativamente más bajos que otros procesos, debido a la combinación con otros procesos térmicos. Algunas (las referencias no mencionan cuáles) incluyen congelamiento de tipo instantáneo con compresión de vapor y plantas de congelamiento secundarias. Por lo tanto, los costos mostrados no deben ser extrapolados a aquellas plantas con capacidades mayores a la citada (231 l/s). Por otro lado, para los fines que persigue este trabajo, estos costos no pueden ser comparados con los costos de otros procesos de desalación, por lo que es conveniente considerarlos con la debida reserva.

III.3.4 Costos de desalación para el proceso de electrodiálisis

Este proceso, junto con la ósmosis inversa, ha demostrado ser uno de los más económicos para la desalación de agua salobre, ya que la operación y el mantenimiento son mínimos, y las membranas han mostrado ser altamente resistentes y durables. La Figura III.5 muestra los costos de operación y mantenimiento y de inversión para un agua producto de 500 mg/l de SDT, según la capacidad instalada de la planta. Como se puede observar en dicha figura, los costos máximos para un sistema de electrodiálisis son de \$1.8 dólares/m³, para salinidades de 10,000 ppm. De la misma forma, se observa que para una planta con una capacidad

instalada de 200,000 m³/día, los costos totales serán de \$1.15/m³. Además, se ratifica el hecho de que a mayor capacidad de la planta los costos se abaten.

CUADRO III.1
DISTRIBUCION DE LOS COSTOS DE UNA PLANTA DE
DESALACION POR MEMBRANAS

CONCEPTO	PORCENTAJE DEL COSTO TOTAL	
	ELECTRODIALISIS	OSMOSIS INVERSA
Costos de inversión	58	41
Membranas	4	12
Energía	20	26
Mano de obra	12	11
Químicos	1	7
Otros	5	3

NOTA: Los costos están basados en una planta con producción de 3,800 m³/d con un influente con SDT de 2,000 mg/l

FUENTE: Reed, S.A., Desalting Seawater and Brackish Water: 1981 Cost Update, Office of Water Research and Tech. Washington, D.C.

**CUADRO III.2
COSTOS DE INVERSION, OPERACION Y MANTENIMIENTO PARA EL
PROCESO DE OSMOSIS INVERSA**

NOMBRE DE LA PLANTA	PRESION DE OPERACION (psia)	C O S T O S		
		OPERACION Y MANTENIMIENTO Dólares/m ³ (1)	INVERSION Dólares/m ³ (2)	TOTAL Dólares/m ³
Cabo Coral	250-265	0.60	.67	1.27
Distrito de Englewood	275-420	1.58 a	1.50	3.08
Sarasota	400	0.61 b	.40	1.01
Venecia	250-275	0.70	.71	1.41
Venecia	180	.84	.70	1.54
Indian River South	400	0.74 c	.62	1.36
Water Island	300	0.59 d	.82	1.41

Notas:

- a) Incluye seguros, ingeniería de soporte y gastos diversos
- b) No se incluye el reemplazo de membranas
- c) Incluye consultorías, seguros y gastos de laboratorio
- d) No se incluye el costo ni mano de obra del reemplazo de membranas

FUENTE: Journal, American Water Works Association, November 1989,
United States of America.

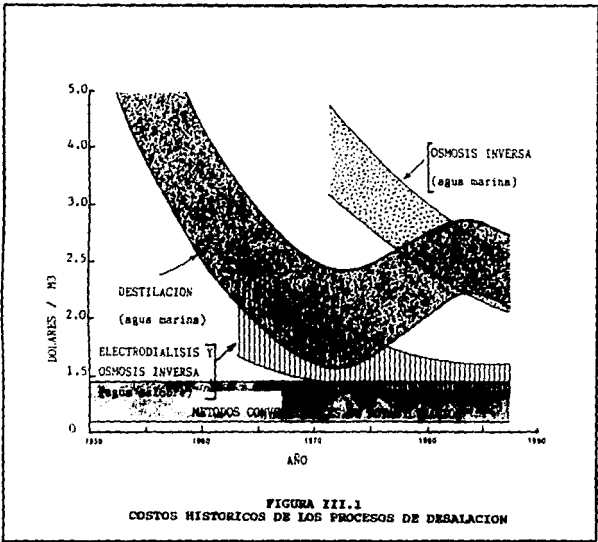


FIGURA III.1
 COSTOS HISTORICOS DE LOS PROCESOS DE DESALACION

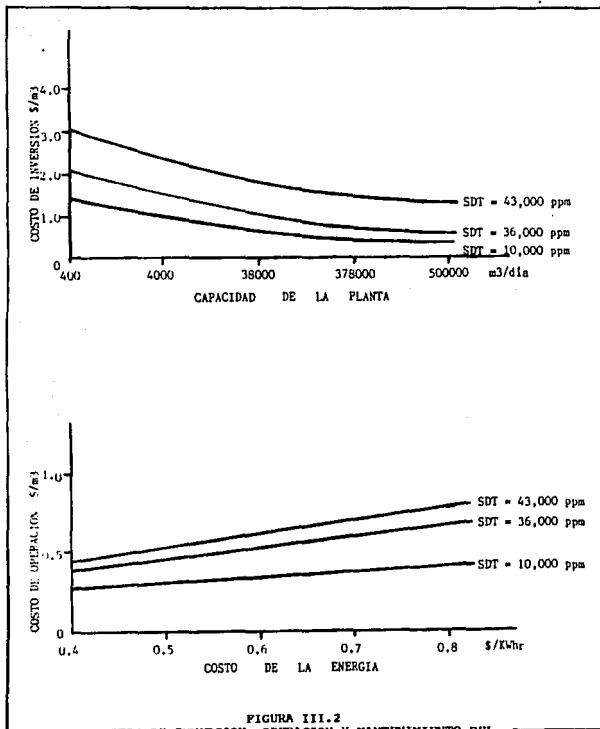


FIGURA III.2
 COSTOS DE INVERSION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DEL
 PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

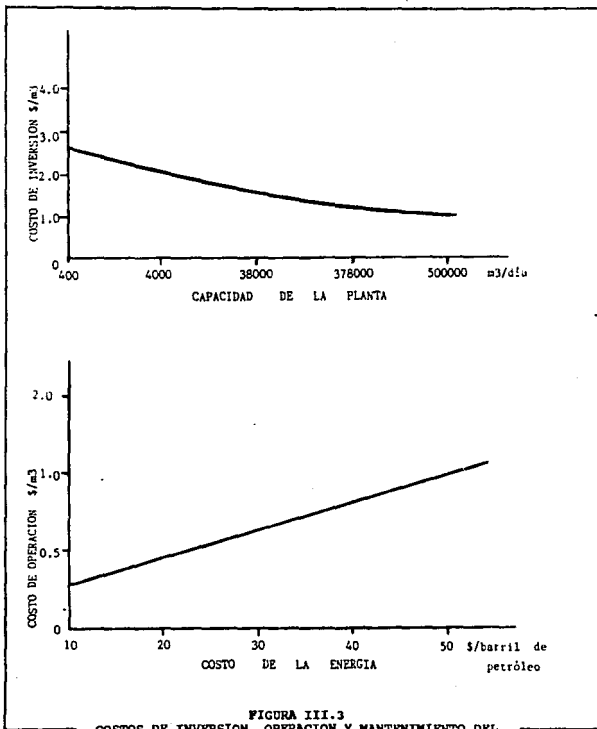
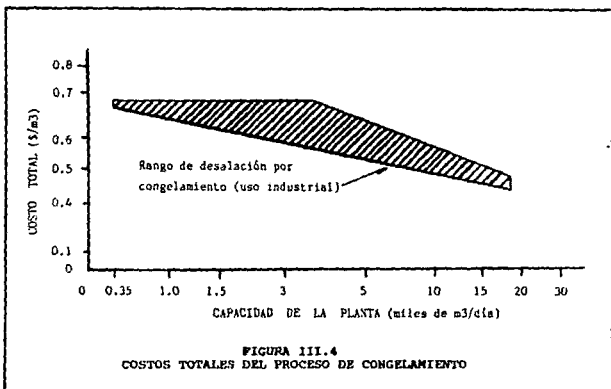


FIGURA III.3
 COSTOS DE INVERSIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL
 PROCESO DE DESTILACIÓN



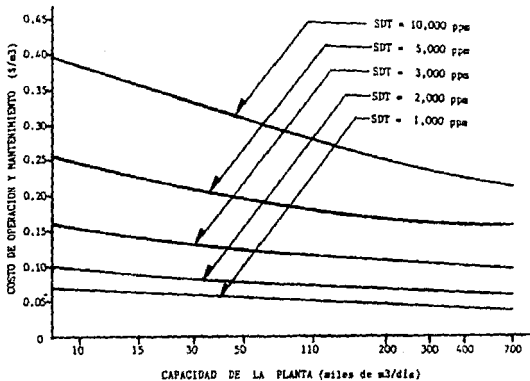
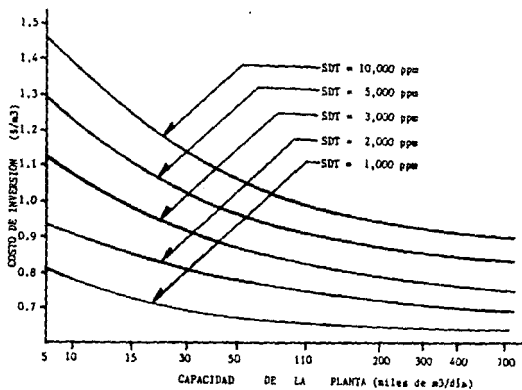


FIGURA III.5
COSTOS DE INVERSION, OPERACION Y MANTENIMIENTO DEL
PROCESO DE ELECTRODIALISIS
(incluye electrodiálisis inversa)

IV. EL CASO DEL ABASTECIMIENTO
DE AGUA PARA EL DESARROLLO
TURISTICO DE
CHEMUYIL, QUINTANA ROO

IV. EL CASO DEL ABASTECIMIENTO DE AGUA PARA EL DESARROLLO TURISTICO DE CHEMUYIL, QUINTANA ROO

IV.1 Antecedentes

El estado de Quintana Roo, ubicado en la región del Caribe, representa por sus bellezas naturales, un importante potencial para el desarrollo de centros urbano-turísticos. Ante esta posibilidad, el Gobierno Federal ha decidido llevar a cabo un ambicioso proyecto en la costa norte del estado, en el área que se conoce como "Corredor Cancún-Tulum", con una extensión de 130 km a lo largo de la carretera costera No. 307, en un ancho promedio de dos kilómetros, comprendidos de la línea de costa hacia tierra adentro. Dentro de este corredor se pretende que Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen, Tulum y Chemuyil, sean las localidades de apoyo a los centros urbano-turísticos.

Por lo anterior, el Gobierno Federal, a través del Fideicomiso de la Caleta de Xel-Ha y del Caribe (FIDECARIBE), encargó a la empresa Constructora y Urbanizadora LEOSMAR, S.A. de C.V., la elaboración de los estudios para la planeación de las líneas de conducción de agua en bloque para los centros urbanos antes mencionados. En el desarrollo de este capítulo se han tomado como base los resultados de tipo económico a los que se llegaron en el estudio en cuestión, los cuales se han adoptado para la comparación entre las dos opciones de abastecimiento de agua a la localidad de Chemuyil, Q. Roo, en particular: 1) extracción, potabilización y conducción de agua subterránea y 2) captación, desalación y conducción de agua marina. Además y como complemento a dichos resultados económicos, se han tomado los índices de costos por concepto de operación y mantenimiento que la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) ha adoptado para los estudios en los distritos de control de la contaminación del agua.

IV.2 Marco físico

IV.2.1 Localización

La localidad de Chemuyil se encuentra localizada dentro del municipio de Cozumel, el cual forma parte de la porción norte del estado de Quintana Roo. La **Figura IV.1** muestra la localización de este estado dentro de la República Mexicana. Las coordenadas extremas del municipio son 20°47' y 19°31' de latitud norte y sur del municipio, respectivamente, y a los 86°43' y 88°00' de longitud oeste al oriente y al poniente, respectivamente. Las altitudes que se presentan en el territorio del municipio no rebasan los 25 m.s.n.m.

El municipio de Cozumel está formado por dos partes, la isla del mismo nombre y la porción continental. La extensión total del municipio es de 4,893 km², o sea, el 9.62% de la superficie total del estado de Quintana Roo. Colinda al norte con los municipios de Benito Juárez y Lázaro Cárdenas, al oriente con el Mar de las Antillas, hacia el sur y al oeste con el municipio de Felipe Carrillo Puerto y al noroeste con el estado de Yucatán. Existen en el municipio 231 localidades, siendo la más importante San Miguel de Cozumel, cabecera del municipio. Otras poblaciones importantes son Playa del Carmen, Tulum, Cobá, San Silverio, Javier Rojo Gómez y Akumal. En la **Figura IV.2** se muestra la división municipal del estado de Quintana Roo y en la **Figura IV.3** se muestra la localización exacta de la localidad de Chemuyil.

IV.2.2 Hidrografía

La constitución geológica del territorio municipal, la mayor parte formada por roca caliza muy permeable, es causa de que no existan corrientes superficiales de agua. Sólo hacia el sureste del municipio, la presencia de partículas finas de origen calcáreo y orgánico impiden la infiltración y da lugar a la formación de varias lagunas como Chunyaxché, Muyil y Boca Paila. El abastecimiento de agua en el municipio se realiza a través de pozos de los que se extrae agua del subsuelo.

IV.2.3 Clima

Existen dos diferentes tipos de clima. En la isla de Cozumel es cálido con lluvias muy abundantes en verano, con influencia del monzón. Se registran temperaturas promedio de 25.5°C y precipitaciones que alcanzan los 1,500 mm anuales. En la porción continental el clima es cálido con lluvias de verano; las temperaturas medias anuales oscilan entre los 25°C y 26°C, y la

precipitación entre 1,100 y 1,500 mm anuales. Los vientos predominantes son los que proceden del sureste. Los ciclones afectan de manera sustancial a la región, aumentando la cantidad de lluvias que se presentan en verano, sobre todo en la isla.

IV.2.4 Clasificación y uso del suelo

Los suelos que se presentan en Cozumel son predominantemente asociaciones de litosoles y rendzinas. En ambos casos son suelos muy jóvenes, poco desarrollados, por lo cual no resultan aptos para la agricultura. El potencial de estos suelos es ganadero y forestal. Estos suelos, que corresponden a los tzekek de la clasificación maya, son delgados, pedregosos y con bajo contenido de materia orgánica. También existen suelos salinos hacia el sureste de la porción continental del municipio y suelos de gley en las zonas denominadas "bajos".

IV.2.5 Flora y fauna

Casi todo el municipio está cubierto por vegetación de selva mediana subperennifolia. Está formada por dos estratos de árboles que alcanzan alturas de entre 15 y 20 metros; en ellos destacan el chicozapote, el ramón, el chechem, el chaká y muchas otras especies.

En algunas zonas al sur y al oeste del municipio, así como en una estrecha faja costera, la vegetación es selva baja caducifolia, compuesta principalmente por chechem, chicozapote y tzaalam. En las zonas indudadas es común el mangalar y el tular. Por lo que respecta a la fauna, los animales son en su mayoría de origen neotropical, aunque también existen animales de origen neártico como el venado. Son importantes las diferentes especies de serpientes, tortugas y monos.

IV.3 Marco socioeconómico

IV.3.1 Población

En 1991 la población total del municipio se calculó en 35,955 habitantes, por lo que la densidad de población es de 7.35 hab/km², una de las más altas de Quintana Roo. Cozumel concentra al 10.2% de la población del estado. A la cabecera municipal siguen en importancia, según la cantidad de población que aglutinan, las localidades de la zona costera continental como Playa del Carmen, Tulum y Akumal. La población del municipio es

relativamente joven, aunque también hay una importante proporción de población en edad productiva como resultado de la migración hacia la isla.

IV.3.2 Servicios públicos

El municipio cuenta con los servicios de energía eléctrica, agua potable y alcantarillado, que están a la disposición de la mayor parte de la población. También proporciona el sistema de recolección de residuos sólidos, mercados, seguridad pública, vialidades, parques y jardines.

IV.3.3 Actividades económicas

Agricultura: Esta actividad utiliza el tradicional sistema de roza y milpa. Por la imposibilidad de mecanización, el cultivo se realiza a espeque. Los principales cultivos son el maíz y el frijol, que arrojan muy bajos rendimientos por las razones antes explicadas.

Ganadería: Destaca la producción avícola de carne y huevo. También existe ganadería de bovinos, porcinos y ovinos, en muy pequeña escala.

Industria: La industria es prácticamente inexistente, realizándose en su mayor parte en talleres de tipo artesanal. Destacan trituradoras de material pétreo, fábricas de hielo y talleres de joyería.

Explotación forestal: En la actualidad la producción es muy escasa pues se carece de la infraestructura necesaria. Sólo se extrae madera corriente tropical para la fabricación de durmientes de ferrocarril.

Minería: Dada la conformación geológica de la península de Yucatán, la actividad minera se reduce a la explotación de yacimientos de roca caliza.

Pesca: La pesca la realizan básicamente sociedades cooperativas. El principal producto obtenido es la langosta y, a nivel municipal, también tienen importancia la pesca de caracol y de diversas especies de escama.

Turismo: En esta actividad se fundamenta la economía del municipio. El principal centro turístico es la isla de Cozumel, que cuenta con una infraestructura turística en la costa

continental, como Boca Paila, Playa del Carmen, Akumal, Pamul y Xel-Há. En el interior del municipio resalta la zona arqueológica maya de Cobá.

Comercio: Se cuenta con una gran cantidad de comercios, sobre todo en la isla. Preomina el pequeño comercio, aunque también existen grandes centros comerciales. En Cozumel destacan los establecimientos especializados en la venta de artesanías cuyo mercado es el turista extranjero, el cual es el mayoritario. En el medio rural el abasto se realiza principalmente a través del sistema de la Compañía Nacional de Subsistencias Populares (CONASUPO).

IV.4 Generalidades del corredor turístico Cancún-Tulum

Dentro de este proyecto se han considerado cinco nuevos centros turísticos, aparte de Cancún, que se considera como una ciudad en pleno crecimiento. Los nuevos centros turísticos estarán apoyados por las localidades de Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen, Chemuyil y Tulum, en los cuales se desarrollarán más de 70,000 cuartos en total y se tendrán cerca de 1'500,000 de habitantes. En el Cuadro IV.1 se muestran los horizontes de cuartos y hotelero para el corredor en cuestión. Como se observa en dicho cuadro, se han considerado tres etapas de crecimiento, para los años 1995, 2010 y 2020, respectivamente. De la misma forma, el Cuadro IV.2 muestra los horizontes habitacionales y de áreas urbanas estimados para cada uno de los centros urbano-turísticos considerados.

Como se puede observar en el cuadro anterior, la población de Chemuyil, Q. Roo, tendrá para los años 1995, 2010 y 2020 una población de 10,000, 20,000 y 40,000 habitantes, aproximadamente.

Como parte del equipamiento urbano a planear, se encuentra la infraestructura hidráulica que permita abastecer de agua potable a los nuevos desarrollos urbano-turísticos, como son la localización de fuentes de abastecimiento, dadas las características geohidrológicas y de calidad de agua, así como la definición de las líneas de conducción para la entrega de agua en bloque a dichos desarrollos.

IV.4.1 Desarrollo urbano de Chemuyil, Quintana Roo

Hacia el sur del desarrollo turístico de Playa del Carmen (ver Figura IV.3), se localiza una zona con predominio de espacios abiertos, donde se plantea la posibilidad de construir 7,000 cuartos para aproximadamente 40,000 habitantes.

Demanda de agua potable

Con base en los datos de usos del agua y destinos del suelo y tomando como base las dotaciones que recomienda FONATUR para este tipo de desarrollos, se calculó la demanda del recurso hidráulico para Chemuyil, Quintana Roo, resultando ésta de 415 l/s.

Sin embargo y dada la lejanía de la disponibilidad de las fuentes de captación de agua subterránea, fue necesario reducir la dotación propuesta por FONATUR, tomando en cuenta que ya existe la tecnología para la reducción en el consumo de agua que ya son muebles de baño de bajo consumo y la reutilización de agua pluvial y el tratamiento de aguas residuales para su reúso en el riego de jardines y áreas verdes. Tomando en cuenta lo anterior, se decidió reducir en un 38% la demanda de agua potable, resultando el gasto de 300 l/s.

Fuentes de abastecimiento de agua potable

Con base en los estudios de prospección geofísica realizados por la Comisión Nacional del Agua en la zona del proyecto, actualmente se llevan a cabo una serie de perforaciones para identificar las zonas potenciales de extracción de agua y que se realizan a lo largo de la carretera Cancún-Nuevo X-can-Tulum.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha considerado que una de las zonas que presenta las mejores condiciones para la explotación del acuífero es la denominada El Tintal, ubicada cerca del poblado de Nuevo X-can, ya que existen espesores de agua dulce del orden de 30 m y a profundidades máximas de perforación de 45 m. De estos estudios se ha calculado que se podrá captar un gasto máximo de 2,300 l/s con un total de 65 pozos.

Otras zonas que se han identificado para la extracción de agua potable son las que se muestran en la Figura IV.4. En la misma se muestran siete zonas potenciales de explotación, con un gasto total aprovechable de 6,100 l/s con 226 pozos perforables.

Entrega de agua potable

La demanda de agua potable para el desarrollo de Chemuyil, que es de 300 l/s, es factible de satisfacer utilizando el agua proveniente de la zona de captación B (Akumal), o bien, aprovechando los excedentes provenientes de Tulum.

Dicha zona B cuenta con un caudal potencial de extracción de 300 l/s y los excedentes que llegan de Tulum son del orden de 380 l/s. Satisfaciendo la demanda de Chemuyil, se puede disponer de un caudal de 680 l/s, los cuales se enviarían hacia los desarrollos ubicados al sur de Playa del Carmen, los cuales demandan un total de 1,230 l/s.

Para llevar el agua de la zona B a Chemuyil, será necesario instalar una línea de conducción de 19,500 m de longitud y 20" de diámetro; asimismo, sobre la carretera No. 307, desde Tulum hasta XCancel se necesita una tubería de 18,200 m de longitud y 30" de diámetro, así como de XCancel se requerirán de 7,100 m de tubería de 20" de diámetro.

Programas y presupuestos

Con base en la infraestructura propuesta para proporcionar el vital líquido a la zona, a continuación se presentan los presupuestos estimados, al final del periodo de planeación, para el centro de Chemuyil. Es conveniente mencionar que, aunque los presupuestos de cada centro urbano-turístico se han presentado en forma separada, la definición de la infraestructura necesaria se realizó en forma integral para todo el corredor. Sin embargo y para fines de comparación, se mencionarán dichos presupuestos calculados solamente para el centro que nos atañe.

Es digno de hacer mención que estos costos corresponden solamente a costos de inversión, por lo que, para poder calcular el costo total de abastecimiento de agua potable, los costos reportados se han afectado por los índices de operación y mantenimiento, con respecto al costo total, que SEDUE utiliza.

El Cuadro IV.3 muestra los presupuestos por concepto y el costo total del proyecto de infraestructura hidráulica para Chemuyil.

Con el fin de determinar la amortización del costo de inversión de las obras propuestas, en el Cuadro IV.4 se presentan las amortizaciones del costo de las obras para periodos de amortización de 16 y 20 años con tasas de interés del 12 y 18%, para ambos periodos. Como se puede observar en dicho cuadro, la

opción que resulta más económica es aquella calculada con un interés del 12% para un periodo de 20 años, con un costo de 773 \$/m³.

IV.4.2 Desalación de agua marina para Chemuyil, Quintana Roo

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo III de este trabajo, de las condiciones geográficas y de los requerimientos de agua potable para la localidad en cuestión, se determinó que es factible captar agua marina para su posterior desalación y aprovechamiento. Lo anterior se debió a que el agua típica de la zona es marina, con un promedio de sólidos disueltos totales de 35,000 ppm (partes por millón) y la capacidad del sistema de desalación estaría dada por la siguiente operación:

$$\text{Capacidad de Planta} = 0.300 \text{ m}^3/\text{s} * 86400 \text{ s/día} = 25,920 \text{ m}^3/\text{día} \\ (26,000 \text{ m}^3/\text{día})$$

Por otro lado, la opción de instalar una planta desaladora a una distancia extremadamente más cerca del centro urbano-turístico reduciría los costos de conducción del agua potable. Por lo tanto, si la planta se instalara a aproximadamente 500 m de la línea de costa, el costo por conducción, siendo el diámetro de la línea de 20" y de acuerdo con los precios unitarios proporcionados por LEOSMAR, resultaría de:

$$\text{Costo de conducción: } 500 \text{ m} * 850,000 \text{ \$/m} = \$425'000,000$$

Si de la misma manera se amortiza este costo con el mismo periodo de amortización y la misma tasa de interés, y dividiendo el resultado entre el volumen anual de agua producto, el costo (en pesos) por unidad desalada está dado por la siguiente ecuación:

$$F. A = \frac{0.12 (1+0.12/12)^{20(12)} - 1}{(1+0.12/12)^{20(12)} - 1} = 0.13388$$

$$\text{Costo de conducción anual amortizado} = 425'000,000 (0.13388) = 56'155,392$$

Costo de conducción por unidad de agua desalada = $\frac{\$ 56'155,392}{9'460,800 \text{ m}^3}$
= 5.9355/m³

Del resultado anterior se observa que, en cuanto a costo de conducción, el sistema de desalación ubicado a una menor distancia que el bloque de pozos resulta extremadamente más económico, siendo a tal grado que resulta el valor anterior despreciable.

Costo de desalación

Ahora bien, de las opciones de desalación analizadas en el capítulo III de este trabajo y habiendo determinado la capacidad de la planta y la calidad típica del agua que se utilizaría como influente (en este caso agua de mar), podemos desechar, de antemano, a los procesos de electrodiálisis (por la concentración de SDT fuera del límite del proceso), y al del congelamiento (por ser la capacidad de la planta más grande que el límite que se ha estudiado en la experiencia). De los dos procesos restantes, destilación y ósmosis inversa, el costo de desalación por el primer proceso resultaría de 2.1 dólares/m³ y, para la ósmosis inversa, de 1.9 dólares/m³, siendo éste el más económico.

Por lo tanto, si actualizamos el dato anterior de 1.9 dólares/m³ al mes de agosto de 1991, el costo en pesos mexicanos sería de \$5,719/m³.

Por lo tanto y considerando los costos reportados en el estudio por LEOSMAR, S.A. de C.V., el costo de abastecer de agua potable a la población de Chemuyil por medio de pozos profundos resulta aún más económico que por la desalación de agua de mar.

Sin embargo, es importante señalar que la opción del abastecimiento de agua desalada es factible desde muchos puntos de vista. Se pueden enumerar muchas razones por las cuales es mucho más ventajosa la opción de agua desalada. A continuación se enlistan las más importantes.

- Primeramente, es indudable que el mar proporcionaría siempre la cantidad de agua necesaria, con una calidad extremadamente estable; en cambio, los volúmenes de agua de los acuíferos de donde se extraería el agua podrían, con el paso del tiempo, mermarse, sin contar con la degradación en su calidad, debida, principalmente, a la intrusión salina.

- Al contrario de potabilizar el agua por sistemas convencionales, la desalación permite ir añadiendo e instalando módulos de desalación en la misma proporción que aumenta la demanda del líquido. Por ende, no se necesitaría invertir en infraestructura que no se estaría utilizando al 100%. En este sentido, la línea de conducción de agua potable desde los acuíferos estaría, desde un principio, diseñada para que trabaje eficientemente hasta que se llegue al horizonte de proyecto. Por el contrario y con el sistema de desalación, es extremadamente más fácil instalar una segunda y tercera líneas de conducción con una longitud cada una de 500 a 700 metros, dependiendo del sistema de distribución. Además, si en determinado momento se modifica el proyecto original, es mucho más fácil cambiar un sistema de desalación, tanto de lugar como de capacidad, que uno convencional.

- También es evidente el hecho de que la calidad del agua se mantendría mucho más estable y aún con mayor calidad por un sistema de desalación que por medio del otro sistema.

- Por otro lado, el hecho de que, en determinado momento y por causas de fuerza mayor, se interrumpa el servicio de agua potable, el sistema de desalación es mucho más probable que siga operando.

Como se puede ver, no es solamente el costo de agua, para este caso en particular, el factor determinante en la decisión de qué sistema se implantaría, existen otros que bien valen la pena analizar, como los que se comentaron anteriormente. Además, los costos de desalación por ósmosis inversa pueden reducirse significativamente, realizándose un estudio de factibilidad técnica y económica que determinen con más claridad y objetividad cuál sistema de abastecimiento es más eficiente.

CUADRO IV.1
HORIZONTES DE CUARTOS Y HOTELES PARA EL CORREDOR
CANCUN-TULUM, QUINTANA ROO

C U A R T O S				
LOCALIDAD	1989	1ª etapa 1995	2ª etapa 2010	3ª etapa 2020
Cancún	14,368	22,000	25,000	30,000
Nizuc	0	2,000	5,000	8,000
Puerto Morelos	71	600	3,000	6,000
Playa del Carmen	454	2,000	7,000	13,000
Chemuyil	16	2,000	4,000	7,000
Tulum	25	2,000	4,000	7,000
T O T A L	14,937	30,600	48,000	71,000

H O T E L E S				
	1ª etapa 1995	2ª etapa 2010	3ª etapa 2020	
Cancún	---	---	---	
Nizuc	40	100	160	
Puerto Morelos	12	60	120	
Playa del Carmen	40	140	260	
Chemuyil	40	80	140	
Tulum	40	80	140	
T O T A L	172	460	760	

FUENTE: Planeación de las Líneas de Conducción de Agua en Bloque para los Centros Urbanos Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum, Quintana Roo, LEOSMAR S.A. de C.V.

CUADRO IV.2
HORIZONTES POBLACIONES Y DE AREA URBANA PARA EL CORREDOR
CANCUN-TULUM, QUINTANA ROO

H A B I T A N T E S				
LOCALIDAD	1989	1ª etapa 1995	2ª etapa 2010	3ª etapa 2020
Cancún	234,712	380,000	440,000	484,000
Nizuc	0	50,000	100,000	200,000
Puerto Morelos	1,568	8,400	25,000	50,000
Playa del Carmen	2,307	34,000	163,000	362,000
Chemuyil	0	10,000	20,000	40,000
Tulum	4,555	74,000	148,000	296,000
T O T A L	243,142	556,400	896,000	1,432,000

A R E A U R B A N A (hectáreas)			
	1ª etapa 1995	2ª etapa 2010	3ª etapa 2020
Cancún	2,533	2,933	3,226
Nizuc	338	675	1,350
Puerto Morelos	56	166	333
Playa del Carmen	226	1,086	2,413
Chemuyil	66	132	266
Tulum	493	986	1,973
T O T A L	3,712	5,978	9,561

FUENTE: Planeación de las Líneas de Conducción de Agua en Bloque para los Centros Urbanos Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum, Quintana Roo, LEOSMAR S.A. de C.V.

**CUADRO IV.3
PRESUPUESTO DE LA ENTREGA DE AGUA POTABLE EN BLOQUE**

CONCEPTO: ACUEDUCTOS				
TRAMO	LONGITUD (m)	DIAMETRO (pulgadas)	PRECIO UNITARIO (millones de pesos)	COSTO TOTAL (millones de pesos)
Tulum-Xcabel	18,200	30	1.480	26,936.0
Xcabel-Akumal	7,100	20	.852	6,049.2
Bateria Akumal	19,500	20	.852	16,613.5
Subtotal	44,800			49,598.7
CONCEPTO: POZOS Y LINEAS DE CONDUCCION DE POZOS A ACUEDUCTOS				
Bateria "B" de pozos	15		300	4,500.00
Bateria "B" L.C.	6,500	6	.1800	1,170.00
Bateria "B" L.C.	3,900	14	.4300	1,677.00
Subtotal	10,400			2,847
Planta potabilizadora				4,081.00
S U B T O T A L				61,026.70
CONCEPTO: OPERACION Y MANTENIMIENTO				
S U B T O T A L				145.90
T O T A L				61,172.60

FUENTE: Planeación de las Líneas de Conducción de Agua en Bloque para los Centros Urbanos Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum, Quintana Roo, LEOSMAR S.A. de C.V.

CUADRO IV.4
PRESUPUESTOS AMORTIZADOS DE LAS OBRAS HIDRAULICAS

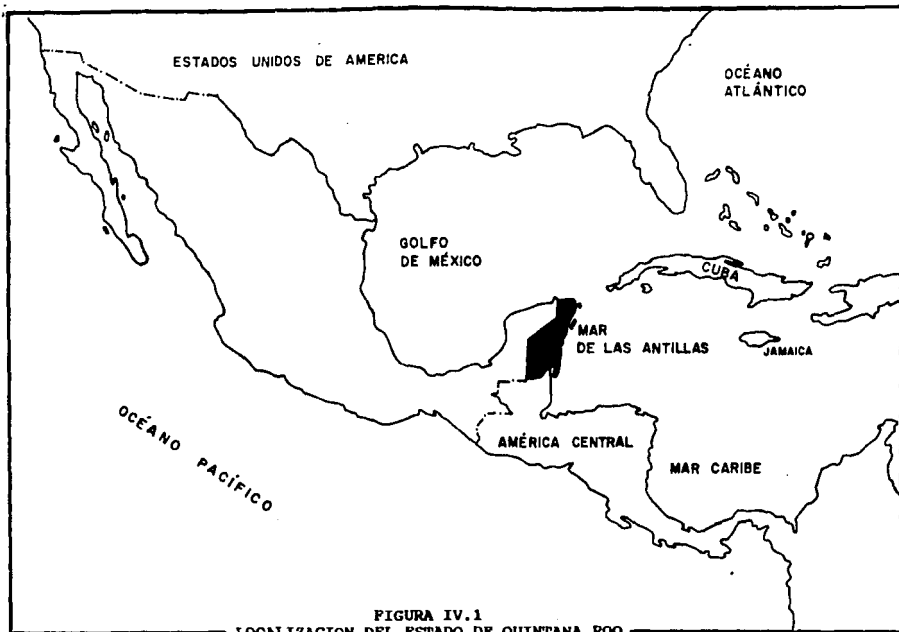
Gasto: 300 l/s

Volumen anual (millones de metros cúbicos): 9.46

Costo total (millones de pesos): 9.46

PERIODO (años)	12%		18%	
	ANUAL (millones de pesos)	COSTO \$/m3	ANUAL (millones de pesos)	COSTO \$/m3
16	7,832	828	10,041	1,061
	12%		18%	
	ANUAL (millones de pesos)	\$/m3	ANUAL (millones de pesos)	\$/m3
20	7,312	773	9,685	1,024

FUENTE: Planeación de las Líneas de Conducción de Agua en Bloque para los Centros Urbanos Nizuc, Puerto Morelos, Playa del Carmen y Tulum, Quintana Roo, LEOSMAR S.A. de C.V.



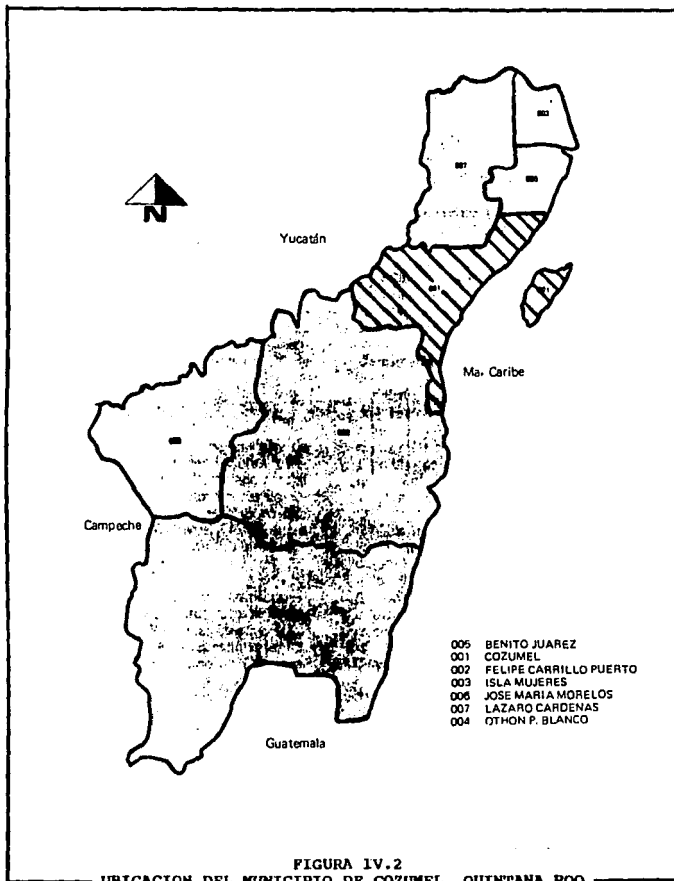


FIGURA IV.2
UBICACION DEL MUNICIPIO DE COZUMEL, QUINTANA ROO

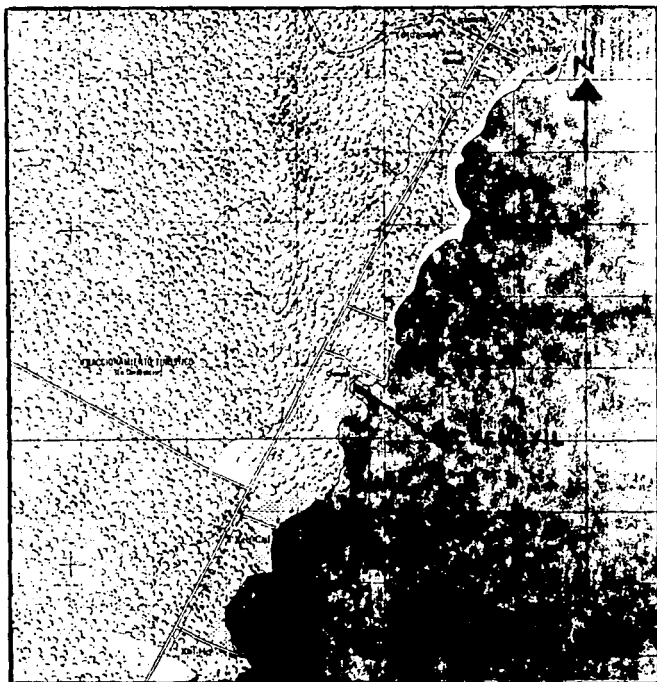


FIGURA IV.3
LOCALIZACION DEL CENTRO TURISTICO DE CHEMUYIL,
QUINTANA ROO

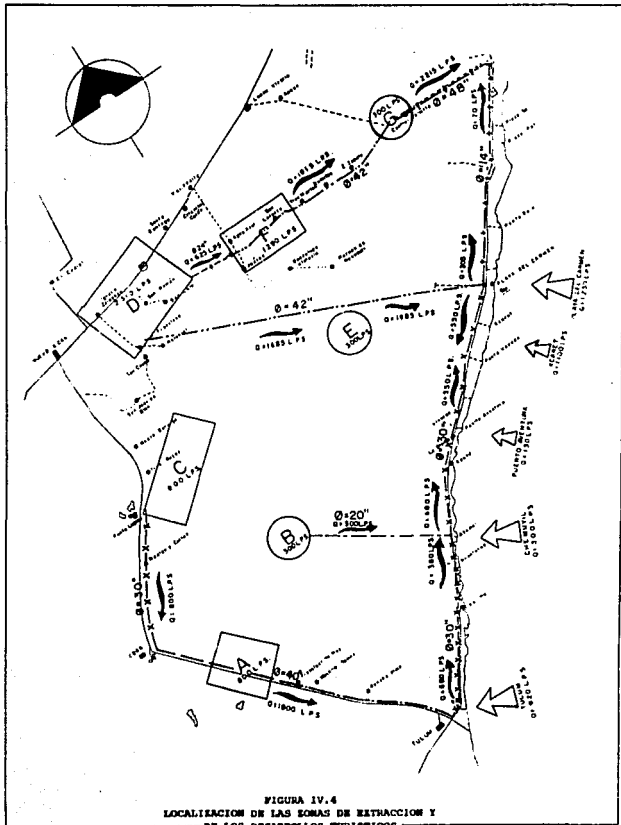


FIGURA IV.4
 LOCALIZACION DE LAS ZONAS DE EXTRACCION Y
 DE LOS DESARROLLOS TURISTICOS

V. CONCLUSIONES

V. CONCLUSIONES

V.1 Calidad del agua

En cualquier sistema de abastecimiento, la calidad del agua dependerá básicamente de dos factores: 1) la fuente de la que se obtiene y 2) el uso al que se destine. De esta manera, un agua que esté destinada al riego de cultivos y parcelas no necesita tener la misma calidad que aquella para el consumo humano, siendo que la primera puede ser inclusive agua residual (muy preferentemente con algún tipo de tratamiento) y la segunda debe ser potable. De la misma forma, aquellas aguas destinadas para diferentes usos que no sea el consumo humano, tendrán calidades diferentes, dependientes totalmente de su destino final. Se cuidará que algunas aguas no contengan carbonatos, como aquellas cuya finalidad sean las calderas; otras no tendrán materia orgánica ni organismos patógenos, como las utilizadas en la industria de alimentos y bebidas. En fin, la calidad requerida de un agua puede ser extremadamente variable, y la consecución de dicha calidad dependerá del tipo de tratamiento a que se le someta y del fin a que esté destinada. Dichas variaciones de la calidad de un agua con respecto al uso que se le de están plasmadas en el Cuadro I.5.

Tal y como se comentó en el capítulo I de este trabajo, aún cuando las condiciones actuales de abastecimiento de agua estén sufriendo problemas en cuanto a cantidad y calidad de la misma, la problemática no sólo se refiere a la cantidad potencial aprovechable, sino a condiciones de uso. No es extraño el hecho de que en infinidad de ciudades se utilice agua de calidad potable para el riego de parcelas. Esto, claro está, conlleva problemas de insuficiencia de agua para la población en cuestión. Así, el problema se limita exclusivamente al tipo de administración que se lleva con respecto al recurso hídrico.

Sin embargo, muchos lugares del mundo no tienen suficientes fuentes de aprovechamiento de agua, siendo que tienen que traerla desde fuentes lejanas, con el consecuente aumento en los costos. Estos lugares están catalogados en el mundo entero como desérticos, en su mayoría, y deben extraer agua de otras fuentes, en muchos casos el agua de mar. Por lo tanto, estos países han incorporado la tecnología de la desalación en sus diversas modalidades. Así, países como Kuwait y los Emiratos Arabes han instalado plantas de desalación de grandes dimensiones, "sacrificando" el costo de desalación por satisfacer el aprovisionamiento de agua a sus pobladores.

V.2 Procesos de desalación

Dentro de los procesos analizados en este trabajo, se puede observar que un parámetro que debe tenerse en consideración en todo proyecto de desalación es la calidad del agua que se utilizará como influente. Para el proceso de ósmosis inversa, el tipo de agua puede ser salobre o marina, ya que existen membranas tecnológicamente aptas para tratar agua de los dos tipos. La destilación y destilación solar, al igual que la ósmosis inversa, no presentan ningún problema para el tipo de agua que vaya a tratar, en cuanto a salinidad, es decir, los procesos son indiferentes a dicho parámetro. El congelamiento también presenta esta ventaja, sólo que se ha estudiado de manera distinta a los demás procesos siendo que se ha utilizado preferentemente con fines industriales. La electrodiálisis y electrodiálisis inversa tienen el inconveniente de ser procesos destinados a tratar aguas exclusivamente salobres, con contenidos de SDT menores a 12,000 mg/l.

Por otro lado, la capacidad de planta requerida también es un factor de selección de proceso de desalación. La ósmosis inversa y la destilación son procesos que pueden usarse para plantas con una gran capacidad de desalación. Por el contrario, la destilación solar, el congelamiento y electrodiálisis son procesos que se utilizan para demandas de agua relativamente bajas.

En las últimas décadas (1950-1990) ha habido un crecimiento substancial de la capacidad total instalada de desalación a nivel mundial, no obstante el aumento del costo de los energéticos en el mundo entero. Lo anterior demuestra que, no obstante dicho incremento en los energéticos, la desalación de agua, tanto salobre como marina, ofrece una buena solución a los problemas de abastecimiento de agua, ya sea con fines industriales o de población.

En México, por no mencionar la vasta experiencia internacional en esta materia, se han realizado proyectos de desalación, casi todos con un éxito sorprendente. Afortunadamente la desalación de agua salada ha ido tomando forma y es, al parecer, un hecho del impulso que se le ha venido dando. Sin embargo y pese a los costos tan elevados que representa este tipo de potabilización, la desalación ha tenido una amplia difusión en México, especialmente en cuanto a ósmosis inversa se refiere. Esto debido principalmente a su versatilidad y alta eficiencia, comparada con los otros procesos de desalación como la destilación.

V.3 Costos de desalación

En lo que se refiere a los costos de desalación, se concluye que hay una gran variación en los mismos. La nota más importante, desde el punto de vista experiencia operacional y que hace notar la literatura técnica especializada, es que algunas plantas obtienen costos por unidad de agua desalada muy bajos, principalmente por lo económico de los combustibles y energía eléctrica empleados. En algunos casos, las condiciones financieras reinantes son excepcionalmente favorables, puesto que el interés del capital y el costo del combustible son excepcionalmente bajos. Además, las condiciones de operación y mantenimiento particulares de cada planta influyen de manera importante en el costo total por unidad de agua desalada. Desde este punto de vista, no es comparable el costo de un proceso con otro, ya que, según las observaciones anteriores, deben de mantenerse todas las condiciones y factores constantes.

De la investigación realizada, se observa una clara tendencia hacia la reducción de los costos del agua con el aumento de la capacidad de la planta. Por ende, es indispensable establecer los horizontes de un proyecto, ya que en una primera etapa y para una cantidad de agua deseable un método puede ser más eficiente que otro, pero a lo largo del tiempo las condiciones de calidad del agua influente y las demandas de agua producto pueden requerir otro tipo de proceso, resultando éste más económico.

Sin embargo, es difícil de decidir, a este nivel tan general, si la desalación de agua de mar se plantea como opción más económica en lugar de los métodos convencionales de potabilización de agua; sería necesario plantear un lugar específico, programar visitas de inspección al lugar, realizar estudios de factibilidad técnica y económica, pedir cotizaciones de equipos de desalación a los diferentes fabricantes que existen a nivel mundial, estudios de conducción y pretratamiento, entre otros. Pero una cosa sí es segura, la desalación de agua se

plantea ya no como una opción que pudiera llegar a pensarse, sino como una opción 100% factible de ser usada, independientemente del uso a que se le someta.

V.4 El caso del abastecimiento de agua para el desarrollo turístico de Chemuyil, Quintana Roo

Tal y como se pudo ver con los resultados alcanzados en el capítulo IV de este trabajo, es necesario establecer las condiciones reinantes de un proyecto en particular para así poder definir las opciones de abastecimiento de agua. Aún cuando en el caso visto se llegó a la conclusión de que la obtención de agua por medio de pozos resulta más económica que la desalación, no se debe, por ningún motivo, eliminarla, ya que la opción de desalación es factible desde muchos puntos de vista. En este sentido y a manera de ejemplo, en Chemuyil puede ocurrir, en un futuro no lejano, que los volúmenes existentes en los acuíferos puedan mermarse tanto en cantidad como en calidad, lo que repercutiría de manera adversa en el proyecto, siendo que, para un desarrollo turístico de primer nivel como éste, el agua es uno de los principales factores en el éxito o fracaso del proyecto entero.

V.5 Conclusiones generales

El agua siempre ha protagonizado uno de los papeles más importantes en la existencia del hombre; de alguna manera ha sido "su dolor de cabeza". Su importancia es tan grande que su descuido implicaría una extensa gama de problemas para él, tanto biológicos como económicos.

El hecho de que el agua forme uno de los principales medios de supervivencia del ser humano, ha hecho que éste se preocupe por su disponibilidad y calidad, dependiendo del uso que se le destine. De esta forma, la interminable investigación a que el agua ha estado sujeta ha implicado una serie de estudios y pruebas para su correcta explotación y administración. Los estudios y cálculos con que se realizan las investigaciones para su correcto uso son interminables. Es por esto que el hombre siempre ha constituido organismos e instituciones que cuiden de ella, tales como la Organización Mundial de la Salud, la Organización Panamericana de la Salud, la Comisión Nacional del Agua, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología y la Secretaría de Salud.

Sin embargo, los métodos convencionales de captación, conducción, potabilización y disposición han hecho que el agua empiece a crear problemas de disponibilidad y calidad; antaño se

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

creía que era un recurso inagotable; craso error. La urgencia de obtener agua para abastecer alguna población ha hecho que no se planeen correctamente sus reservas y, con aún más relevancia, su futura disposición, ocasionando que las únicas fuentes, que si bien en un principio eran escasas, ahora sean degradadas en su calidad. Con esto no se quiere decir que todos los sistemas de abastecimiento de agua potable, alcantarillado y tratamiento sean erróneos, sino que, mejor dicho, han sido mal administrados, atendiendo intereses ajenos. Es por esto que el hombre, en su apuro de obtener nuevas y mejores fuentes de agua, ha recurrido a la tecnología disponible para crear dispositivos más eficientes de potabilización. Uno de éstos ha sido la desalación de agua de mar, en vista de que los océanos han demostrado ser, hasta cierto grado, las únicas fuentes inagotables de agua; e inclusive también han sido deteriorados, con los actuales y tan de moda derrames de petróleo. En Kuwait, uno de los países cuya principal fuente de agua es el Golfo Pérsico y cuyas desaladoras proveen de agua al 95% de la población, su problema geográfico-político, surgido a principios de 1991, puso en inminente peligro sus plantas desaladoras.

Sin embargo y por fortuna, se han formado, a nivel mundial, entes concientes de este problema, impulsando y apoyando a aquellos países con problemas del recurso hídrico.

ANEXO A

ANEXO A

PAIS	NOMBRE DE LA EMPRESA	TELEX
ALEMANIA FEDERAL	IPEKHYBRID	5218341 IPG D
ALEMANIA FEDERAL	KRAFTALAGEN AKTIENGESSELLSCHAFT	461831
ALEMANIA FEDERAL	MANHESMANN ANLAGENBAU AG.	8586677
ALEMANIA FEDERAL	MASSERSCHMITT BOLKOW- BLOHM GMBH	5287470
ALEMANIA FEDERAL	OSMOTEC GESELLSCHAFT FUR	17410210
ALEMANIA FEDERAL	SECUMAT, D-2803 WEYHE-DREYE	17420310
AUSTRALIA	EVERGREEN EXPORT SERVICES (INTERNATIONAL)	AA176703
AUSTRALIA	T.O. CONNOR & SONS PTY LTD CAVAN	AA82605
AUSTRALIA	AUSTEP PTY LTD	AA39328
AUSTRALIA	THE PERMITIT COMPANY OF AUSTRALIA	AA24742
AUSTRALIA	PROCESS HEAT TRANSFER	AA34597
AUSTRALIA	OSMOTRON AUSTRALIA	AA96243
AUSTRALIA	PEGLER HATTERSLEY AUSTRALIA PTY LTD	AA34584
AUSTRALIA	THE PERMITIT COMPANY OF AUSTRALIA	AA24742
AUSTRALIA	SIEMENS LIMITED	AA30425
AUSTRALIA	SPORTS MARINE (INTERNATIONAL) PTY LTD	43470
AUSTRALIA	ARCADIA	AA152156
AUSTRALIA	MCINTYRE MARINE SERVICES	AA72643
BELGICA	SA EPURATION & D ^e ENTR.	25237
BELGICA	SA WANSON (ETS)	22316
BELGICA	NV ERIE CONTROLS EURCPE	33186
BELGICA	NV CULLINGAN	21959
BELGICA	NV EPURO	34411
BELGICA	PVBA LIW ENGINEERING	12155
BELGICA	SA ACEC ENERGIE (DIV. EXPORT)	51227
CANADA	BEDARCO MC GURGER INC	05566368
CANADA	BC EQUIPMENT CO. LIMITED	0453181
CANADA	CULLIGAN OF CANADA LIMITED	06982336
CANADA	DOUGLAS BROTHER DIV. OF ROBERT MITCHELL INC.	05825854
DINAMARCA	GENERATOR VARHPRODUKTER	43179 GENAS
DINAMARCA	LKM LAVRIDS KMOSEN MASKINFABRIK A/S	51363 LKM DM
ESPAÑA	IPRA ING. DE PROCESOS AUTOMATICOS,SA.	98636 IPRA-E
ESPAÑA	KRUPP IBERICA, S.A.	44395 KIBM-E
ESTADOS UNIDOS	AQUA DESIGN, INC	4996853 AQUADZN
ESTADOS UNIDOS	MECHANICAL EQUIPMENT COMPANY, INC	460165 MECO NLN
ESTADOS UNIDOS	SCIENCO SYSTEMS, INC	44-2449 SCIENCO STC
ESTADOS UNIDOS	STREAM INTERNATIONAL, INC	160808
ESTADOS UNIDOS	AROCON	697 1411 AROCON
ESTADOS UNIDOS	WATER SOURCE	80-3439 WATERMAN NIA
ESTADOS UNIDOS	EMCO ENGINEERING, INC	924326 EMCO
ESTADOS UNIDOS	BLUE SPRING CORPORATION	499 3027 BLUSPR
ESTADOS UNIDOS	SCIENCO SYSTEMS, INC	44-2449 SCIENCO STL
ESTADOS UNIDOS	VILLAGE MARINE TEC.	182445 VILMAR

continuación del ANEXO A

PAIS	NOMBRE DE LA EMPRESA	TELEX
ESTADOS UNIDOS	LIFESTREAM	706770 INTL N20
ESTADOS UNIDOS	WATER PURIFICATION FOR	803482 WETTECH V.P.B.
ESTADOS UNIDOS	APPLIED WATER ENGINEERING, INC	453191 APLD WATER SLC
FRANCIA	SIDEM BBC BROWN GOURING	
FRANCIA	DEGREMONT	
HOLANDA	PROMAC, B.V.	50110 PROMC NL
HOLANDA	MIEENS WATERZUIVERING, B.V.	39764 MINIS NL
HOLANDA	AMFITEC B.V.	24176 BLUE NL
HOLANDA	HVA WATER CONTRACTORS B.V.	10210 LAI NL
HOLANDA	ASEA BROWN BOVERI B.V.	21539 ABB NL
HOLANDA	FILTERSAND AND GRAVEL	47533 LOON NL
HOLANDA	WATER IS OUR ELEMENT	24536 DELTA NL
HOLANDA	FUGRO GEOTECHNICAL ENGINEERS BV	31010
HOLANDA	TEBODIN, CONSULTING ENGINEERS	31580
INGLATERRA	AWE (WATER PURIFICATION PLANT) LTD	497810 AWATEA
INGLATERRA	AITON AND CO. LTD STORES RD	37444 AITON G.
INGLATERRA	ASEA BROWN BOVERI LTD	261 243
INGLATERRA	ALDOUS AND STAMP LTD	896691 ALSTAMP
INGLATERRA	ALSTAR ENGINEERING LTD	339559 ALSTAR G.
INGLATERRA	CAIRD AND RAYNER BRAVAC LTD	922614 CAIRD G.
INGLATERRA	CLARK INDUSTRIES	597183 G CLARK G.
INGLATERRA	CHILTERN WATER TREATMENT CO. LTD	837139 DEWPLIN G.
INGLATERRA	CLEARWATER SYSTEMS,	859356 CLEAR
INGLATERRA	CULLIGAN INTERNATIONAL CO.	83146 CULINT G.
INGLATERRA	DEMPLAN (E.T.) LTD	837139 DEWPLIN G.
INGLATERRA	DEMPLAN GROUP LTD	837139 DEWPLIN G.
INGLATERRA	DEMPLAN (W.T.)	837139 DEWPLIN G.
INGLATERRA	ESMIL WATER SYSTEMS LIMITED	837249 ESMIL UK G
INGLATERRA	GREENBANK ENGINEERING GROUP LTD	63454 GREENBANK
INGLATERRA	INVENT INDUSTRIAL PRODUCTS LTD	635105 INVENT G
INGLATERRA	JMJ MAUS LTD	929805 MAUS G
INGLATERRA	KENNICOTT, NEI THOMPSON LTD	337412
INGLATERRA	LECTRAC, LTD	94014003 AQUA G
INGLATERRA	LEIGH POLLUTION CONTROL LTD	335684 LEPOLL G
INGLATERRA	ELGA LTD	83516 ELGAL G
INGLATERRA	THE PERMUTIT COMPANY LIMITED	24440 PERM G
INGLATERRA	PROMINENT FLUID CONTROL (UK) LTD	342107 CFG UK
INGLATERRA	SATEC LTD	36421 SATEC G
INGLATERRA	SATEC PWS LTD	837544 PWS G
INGLATERRA	SATEC PWS LTD (JOHNS INDUSTRIAL STATE)	837544 PWS G
INGLATERRA	SERCK BAKER LTD	43567 A/B SERBAK G
INGLATERRA	SEVERN WATER SERVICE	335672
INGLATERRA	TIMEGUARD TRADING LTD	337496 TIGARD G

continuación del ANEXO A

PAIS	NOMBRE DE LA EMPRESA	TELEX
INGLATERRA	WALKER ENGINEERING LIMITED	35170 WALKER G
INGLATERRA	BHWATER LTD	859529 BHWATER G
INGLATERRA	DAVY MCKEE (LONDON) LTD	22527
INGLATERRA	LANCY EFFLUENT TRATAMIENTO	87509 ERG G
INGLATERRA	MARSHALL OMR HOODINGS LTD	777345 MAROPR G
INGLATERRA	MARSHALL OMR MARINE PRODUCTS LTD	777345 MAROPR G
INGLATERRA	SEMAT TECHNICAL (UK) LTD	23671 SEMAT G
INGLATERRA	WAMSON CO. LTD	261169
INGLATERRA	WILKY GROUP LTD	859446 WILKY G
INGLATERRA	ALFA LAVAL ENGINEERING	22769 ALBREN G
INGLATERRA	SASAKURA ENGINEERING CO.	87144 SASACO G
INGLATERRA	WEIR WESTGARTH LTD	849971
INGLATERRA	AMES CROSTA BABCOCK LTD	63410 AMES G
ISRAEL	AQUAPORT (ISRAEL DESALATION ENGINEERING	53590
ITALIA	AB PROGETTI SRL	4278 AB PROJ
ITALIA	BOSCO IND MECC.SPA	660032 BOSCOI
ITALIA	BREDA PROGETTI COSTR. SPA	62419 BREDAP
ITALIA	CEVI ESTERO SRL	460870 CEVI I
ITALIA	CIAL. ACQUATECNICA ITALIANA	325330
ITALIA	C.I.D.A. DI. P.I. STEFANAZZI G.	325329
ITALIA	CINIMONTURI SPA	312051 CINIMONTI
ITALIA	COOP. MURATORI CEMENTISTI C.W.C.	550262 551332 CMC RA
ITALIA	CTIDA SRL	340867 CTIDA I
ITALIA	CULLIGAN INTALIA SPA	510330 CUIT I
ITALIA	DAM SPA	550560 DAMRA I
ITALIA	DEGREMONT ITALIA SPA	
ITALIA	DE PRETTO ESCHER WYSS SPA	480138 DPEWST
ITALIA	DE PRETTO ESCHER WYSS SPA	271279 DPEWST
ITALIA	DE PRETTO ESCHER WYSS SPA	621607 DPEWRI
ITALIA	DIEN DISTRIBUZIONE IND. MARINA	
ITALIA	ECONACCHINE SPA	224237 ECONA I
ITALIA	ECOTECNICA SPA	300666 ECOTEC I
ITALIA	EUROTECNICA CONTR. AND ENG. SPA	312056 EUROTEC I
ITALIA	FERRARI DOTT ING. PAOLO SRL.	326095 ALFER I
ITALIA	FINCIMEC SPA	200698 FINCNO I
ITALIA	FOSTER WHEELER ITALIANA SPA	310548 331255 REWOP1
ITALIA	GIANAZZA ANGELO E C	351504 GIAPPA I
ITALIA	MOLST ITALIA SPA	614297 MOLST I
ITALIA	HYDRO AIR RESEARCH SRL	326836 HYDRO I
ITALIA	ICIT SPA	910344 ICIT I
ITALIA	I.O.E.C.D. SRL	
ITALIA	IDRECO SPA	321062 IDRECO I
ITALIA	IDROCONSULTING SRL	322070 IDEMI I

continuación del ANEXO A

PAIS	NUMERO DE LA EMPRESA	TELEX
ITALIA	IDRODEPURAZIONE DIVIS LAMBRO	333472 IDROI
ITALIA	LEMSA GRUPPO SPA	331337 LEMSA I I
ITALIA	IL CASCO SRL	210456 CASCO I
ITALIA	ITALIMPIANI I GRUPPO IRI SPA	270262 271390 ITIMP I
ITALIA	ITALVENSKA SPA	270518 ITASVE I
ITALIA	LOWARA SPA	480427 480681 LOWARA I
ITALIA	MANHESMANN DEMAG SPA	330135 DEMAGIA I
ITALIA	MARELLI IMP. TECNOLOGICI	330358 ITEM I
ITALIA	MENCAGLIA DI MENCAGLIA F.	
ITALIA	MEPECO SRL	315535 MEPECO I
ITALIA	MILANTECNICA SRL	320254 MITEC I
ITALIA	NOVA SPA OFF. METALNEC	333010 NOVAOF I
ITALIA	PALUMBO INGG S.E.G. SNC	721559 PALUX I
ITALIA	PANELLIA SPA	210336 PANELL I
ITALIA	REDA SAS	315110 REDA I
ITALIA	REGGIANE DMI	530665 REGOM I
ITALIA	ROSSETTI ING GIUSEPPE SPA	310110 ROSSET I
ITALIA	SACCINERO ING. A. SPA	431017 IMPSAC I
ITALIA	S.B.M. SRL	
ITALIA	BESTOTERMICA SAS	315218 SESTER I
ITALIA	SICILMONTAGGI SPA	970416 SIMONT I
ITALIA	SOIMI SOCIETA IMPIANTI IND. LI SPA	330229 SOLMI I
ITALIA	S.T.E. SALVATORE TRIFONE E FIGLI	333180 OTRITO I
ITALIA	STILMAS SPA	330211 350868 STILM I
ITALIA	SUD MONTAGGI	911533 SUDMI
ITALIA	TECSALDO SPA	285224 TECSPA I
ITALIA	TERNOKIMIC CORPORATION SPA	
ITALIA	TERNOMECCANICA ITALIANA SPA	
ITALIA	TURBO SPA	440075 TURBO I
ITALIA	W.T.D. SRL	623353 WTD I ROMA
JAPON	EBARA-EFILCO CO. LTD	J22441 EBAFILCO
JAPON	HITACHI LTD	J22395 J22432 HITACHY
JAPON	HITACHI SHIPBUILDING & ENGINEERING CO. LTD	J22363 J24490 SHIPYARD
JAPON	SHIKAWAJIMA-HARIMA HEAVY INDUSTRIES CO. LTD	J22232 J23507 IWICO
JAPON	KANASAKI HEAVY INDUSTRIES LTD	242-4371
JAPON	KITAMURA VALVE MFG. CO. LTD	J22153
JAPON	KOBE STEEL LTD	222-3601 KOBSTL J
JAPON	KURITA WATER INDUSTRIES LTD	2234694 NIZTOK J
JAPON	MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES LTD	J24612 MITSUBISHI CEC
JAPON	MITSUBISHI KAKOKI KAISHA LTD	J22624
JAPON	HITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO. LTD	J22821 J22924
JAPON	SASAKURA ENGINEERING CO. LTD	J63802 SASAKURA
JAPON	SUMITOMO HEAVY INDUSTRIES LTD	J22580 SUMIJUKB

continuación del ANEXO A

PAIS	NOMBRE DE LA EMPRESA	TELEX
JAPON	TOSHIBA CORPORATION	J24344 TOSHIBA
JAPON	TSUKISHIMA KIKAI CO. LTD	J26696 TSUKISHIMA
JAPON	JGC CORPORATION	0222-3096 JGC10K J
JAPON	TOYO ENGINEERING CORPORATION	02223344
JAPON	C. ITOH & CO. LTD	J22295 J22296 J22297
JAPON	MARUBENI CORPORATION	J22326 J22327 J22328
JAPON	mitsubishi CORPORATION	J22222 MITUBISI
JAPON	NISSHO IMAI CORPORATION	J22233 NISSHOIMAI TOKIO
JAPON	TOTO MENKA KAISHA LTD	J22421 J22548 J22332
SUECIA	SVEBEK	19620

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

The Barnstead Basic Book on Water, Ed. Barnstead Company, United States of America, 1972, pp 102.

LVOVICH, Mark, El Agua en el Mundo; Presente y Futuro, 1ª Edición, Editorial Cartago, Buenos Aires, Argentina, 1975, pp 190.

WEBER, W.J., Physicochemical Processes for Water Quality Control, Ed. Wiley and Sons, 1972.

American Water Works Association, Journal, "Membrane Technology", November 1989, Vol 81, United States of America, pp 43.

SPIEGLER, K.S., Principles of Desalination, Academic Press Inc., copyright 1966, United States of America, pp. 566.

FORTEUS, Andrew, Saline Water in Distillation Processes, Longman Groupo Ltd, 1975, first edition, London, England, pp. 150.

CESAR, Valdez Enrique, Luis A. Gutiérrez Morales, Abastecimiento de Agua Potable, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, Departamento de Ingeniería Sanitaria Universidad Nacional Autónoma de México, 1990.

LEVINE, Sumner N., Selected Papers on Desalination and Ocean Technology, Dover Publications Inc., copyright 1968, New York.

RILEY, Robert L, Gonzalo G. Pique, Manual Práctico de Osmosis Inversa, UOPS Fluid Systems San Diego, California, Estados Unidos de América, 1989, pp 55.

INEGI, Los Municipios de Quintana Roo, Enciclopedia de los Municipios de México, Secretaría de Gobernación, México, 1987.

"Primer Congreso del Continente Americano sobre Desalación", volúmenes I y II, Ciudad de México, octubre 24-29, 1976.

SAHOP, "Curso Teórico Práctico sobre Desalación, DIGAASES, México, 1980.

DELYANNIS A., E. Delyannis, Proceeding of the Third International Symposium on Fresh Water from the Sea, Athaus, 1970.

ONU, Segundo Estudio Realizado por las Naciones Unidas del Funcionamiento de las Plantas de Desalación, Nueva York, 1974.

Desalination Plant, Sasakura Engineering Co., Ltd., Japan 1988.

"Permasep Permeators; Water Treatment by Reverse Osmosis",
DuPont, United States of America.

SARH, Plan Nacional Hidráulico 1981, Comisión del Plan Nacional
Hidráulico, México, 1981.

American Water Works Association, Water Quality and Treatment,
third edition, United States of America, 1971.

BLOEMER, J. W., et al, Proceedings on the First International
Symposium on Water Deslination, Washington, D.C., 1965.

Secretaría de Programación y Presupuesto, XI Censo de Población y
Vivienda, Estado de Quintana Roo.

"Desalinización", Desarrollo Nacional, volumen 38, Número 1,
enero/febrero 1991, pag. 12.