



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

25  
189

**“PLANTA DE DESALACION DE AGUA DE MAR COMO  
FUENTE POTENCIAL DE RECURSOS HIDRAULICOS  
EN ZONAS ARIDAS”**

**T E S I S**

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

**P R E S E N T A N:**

**MARIA DE LOURDES TREVIÑO OLIVAS  
ANTONIO DE LA COLINA GURRIA**

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# I N D I C E

P á g.

CAPITULO I.	ANTECEDENTES.	1
I.1.	Situación de los recursos hidráulicos en la República Mexicana.	2
I.2.	Desequilibrio en los recursos hidráulicos por la explosión demográfica y la contaminación ambiental de las grandes urbes.	8
I.3.	Necesidad de recursos hidráulicos en la Península de Baja California.	11
CAPITULO II.	REGION DONDE SE UTILIZARA LA PLANTA DESALADORA.	13
II.1.	Localización.	14
II.2.	Recursos.	14
a).	Orografía.	14
b).	Hidrografía.	14
c).	Climatología.	16
d).	Flora y fauna.	16
e).	Vías de comunicación.	17
f).	Suministro de energía eléctrica y combustibles.	17
II.3.	Destino de la comunidad.	18

II.4. Población.	21
a). Capacidad turística.	21
b). Población flotante.	21
c). Población de apoyo.	22
d). Población futura.	23
II.5. Consumo de agua.	26
II.6. Fuente de abastecimiento.	26
II.7. Selección del método de desalación.	27
 CAPITULO III. SELECCION DEL PROCESO.	 28
III.1. Clasificación.	29
III.2. Descripción de los procesos.	29
a). Procesos basados en evaporación- destilación.	29
- Evaporación solar.	30
- Evaporación súbita en múltiples etapas.	32
- Compresión de vapor.	34
b). Procesos basados en membranas.	36
- Osmosis inversa.	36
- Electrodialisis.	38
 III.3. Parámetros a considerar para la selec- ción del proceso.	 40
a). Características del agua de ali- mentación.	40

	P á g.
b). Pretratamiento del agua de mar.	44
c). Pureza requerida del producto o destilado.	45
d). Fuente de energía externa de la planta.	46
e). Mano de obra.	46
f). Capacidad requerida de la planta desaladora.	47
III.4. Selección del proceso más viable.	49
III.5. Descripción del proceso de evaporación súbita en múltiples etapas.	50
<b>CAPITULO IV. DISEÑO DEL SISTEMA.</b>	<b>54</b>
IV.1. Fundamentos de Transferencia de Calor.	55
IV.2. Antecedentes y descripción.	57
IV.3. Datos de diseño.	58
IV.4. Análisis y diseño del sistema para la planta.	59
a). Masa de alimentación al sistema.	59
b). Masa de recirculación.	60
c). Factor de recirculación.	63
d). Sección de adición de calor.	64
e). Factor de comportamiento	64
f). Coeficiente total de transferencia de calor.	67

	P á g.
g). Area de transferencia de calor.	68
h). Sección de aprovechamiento de calor.	74
i). Sección de rechazo de calor.	79
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	83
B I B L I O G R A F I A.	87

## P R O L O G O

Las áreas continentales sufren serios y crecientes déficits de agua a pesar de estar rodeadas por este recurso vital. Tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por agua. Sin embargo, los océanos ocupan aproximadamente el 98% de esta cantidad mientras el restante 2% es de aguas continentales. Desgraciadamente las aguas dulces no están distribuidas con la regularidad precisa para atender a las necesidades de consumo de las grandes urbes.

Entre los problemas principales a que se enfrenta el mundo están: la distribución irregular del agua en las diferentes regiones; la rápida reducción de las reservas en los centros sobrepoblados, y la creciente contaminación de los recursos hidráulicos disponibles. Todos estos problemas se han agravado a medida que aumenta la población y crece la demanda de agua, se multiplican sus usos, en la vida doméstica y en el desarrollo de la industria, mientras las existencias del líquido permanecen constantes.

La carencia de agua no es exclusiva de las zonas áridas, donde la escasez es crónica, sino que es común a todas las regiones del planeta, aun las que cuentan con lluvias abundantes y bien distribuidas.

La magnitud de estos problemas son distintos en cada país, pero en algunos casos presentan caracteres realmente graves.

Nuestro país es un ejemplo de este panorama: tiene esca-

sos recursos hidráulicos y centros urbanos sobrepoblados.

Los recursos hidráulicos nacionales presentan una distribución desigual: tiene en el Sur de México abundancia de agua, lo que contrasta con las zonas norte y centro del país que en su mayoría son áridas o semiáridas.

En un futuro cercano la necesidad de recursos hidráulicos será tan importante para el desarrollo de la nación que tendrán que encontrarse soluciones de diverso tipo debido a la mala distribución del agua en el territorio mexicano.

Es tarea de los ingenieros, y de otros profesionales, adelantarse a las necesidades colectivas de agua apenas se presentan, pues la vida actual de ritmo acelerado no admite dilaciones.

El presente estudio se encamina a contribuir con una alternativa a la solución de proveerse de recursos hidráulicos por medio de la desalación de las aguas del mar, puesto que esta inmensidad líquida ofrece inmejorables perspectivas para el futuro.

Así pues, considerando la geografía y las necesidades de nuestro país para el año 2,000, se ha seleccionado la Península de Baja California como el lugar adecuado para ubicar una planta desaladora. Esta localización se basa en la falta de agua potable lo que limita el crecimiento de la población.

CAPITULO I. ANTECEDENTES.

- I.1. Situación de los recursos hidráulicos en la República Mexicana.
- I.2. Desequilibrio de los recursos hidráulicos por la explosión demográfica y la contaminación ambiental de las grandes urbes.
- I.3. Necesidad de recursos hidráulicos en la Península de Baja California .

## I.1. Situación de los recursos hidráulicos en la República Mexicana.

Entre los problemas vitales del México actual destacan la irregular distribución del agua, la rápida disminución de las reservas de este recurso en las zonas sobrepobladas y la creciente contaminación de los recursos hidráulicos disponibles.

Nuestro país cuenta, en su conjunto con agua en cantidades suficientes para satisfacer sus necesidades presentes y futuras, pero las anteriores condicionantes no permiten aprovechar ese precioso elemento a escala nacional y dejan a más de la mitad del territorio nacional con un abastecimiento de agua insuficiente o nulo, por lo que una gran parte de la población está sujeta a un déficit crítico que constituye un freno para el desarrollo económico y social.

Por lo general, las grandes disponibilidades de agua se encuentran abajo de los 500 msnm y al sur de los paralelos 28° , en las fajas costeras del Pacífico y 24° en las del Golfo de México, mientras las necesidades más apremiantes se presentan arriba de esta altitud y al norte de dichos paralelos, siendo la Península de Baja California la que padece más grave escasez general de agua. Por lo tanto, más del 85% de los recursos hidráulicos del país se encuentran en la mencionada zona baja, en tanto que el 70% de la población está en la zona alta, donde también se agrupa el 80% de la industria nacional, con sus tradicionales problemas de insuficiencia de agua .

Dentro de nuestro sistema económico, la posición relativa de los recursos hidráulicos ha sufrido un cambio radical y el elemento agua está entrando apresuradamente en el campo de los bienes de producción. Esta situación debe atribuirse: al crecimiento de la población; al aumento de los consumos doméstico y municipal; a la afluencia creciente de la población del campo a la ciudad, donde ya los consumos de agua per cápita son mayores; al empleo de cada vez más importantes cantidades de agua en la agricultura; el desarrollo de industrias básicas que usan grandes volúmenes de agua; así como el aumento progresivo de la contaminación del agua en las áreas más densamente pobladas e industrializadas.

En la actualidad se dispone de una información, razonablemente amplia, sobre la magnitud y la distribución de los recursos hidráulicos del país; información que es el resultado de largos años de observación sistemática y directa del régimen de los principales ríos, y sus tributarios, en diferentes puntos de las cuencas.

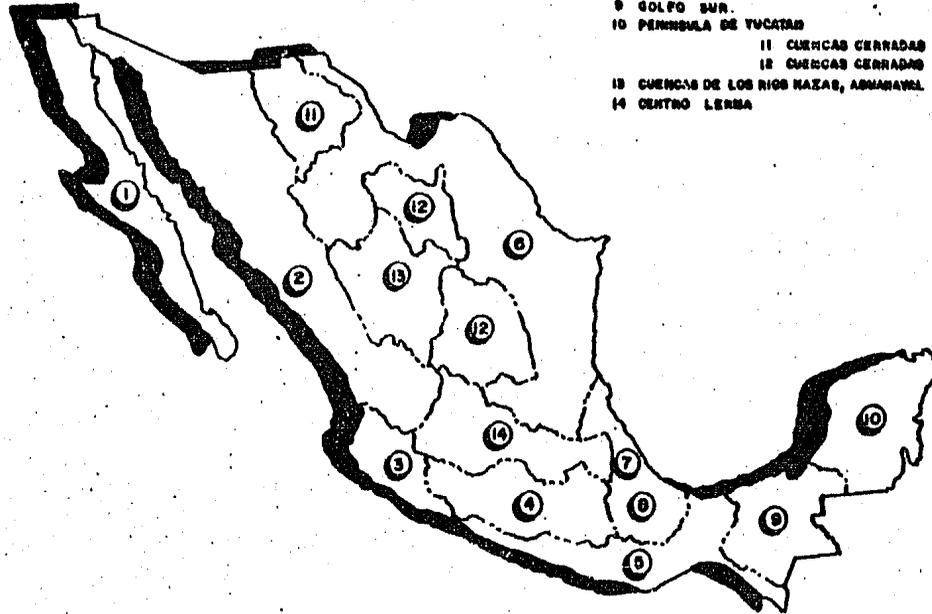
Para estudiar el aprovechamiento racional de los recursos hidráulicos de México, la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos dividió el país en catorce regiones o unidades naturales, delimitadas prácticamente, en todos los casos, por medio de las líneas de parteaguas del sistema orogénico y adoptando el recurso agua como factor determinante de la regionalización. (Ver Fig. I.1.)

A continuación se incluye la Tabla No. 1, con información relativa a los volúmenes anuales de agua disponibles en cada una de las catorce regiones, así como las disponibilidades anuales

de agua por habitante en los años 1980, 1990 y 2000. La reducción de las disponibilidades de agua en algunas regiones adquirirá caracteres críticos a corto plazo.

## REGIONES

- 1 PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA
- 2 NOROESTE
- 3 PACIFICO CENTRO
- 4 CUENCA DEL RIO BALSAS
- 5 PACIFICO SUR Y ZONA ISTHMICA
- 6 GOLFO NORTE
- 7 GOLFO CENTRO
- 8 CUENCA DEL RIO PAPALOMAN
- 9 GOLFO SUR
- 10 PENINSULA DE YUCATAN
- 11 CUENCAS CERRADAS DE CHIHUAHUA
- 12 CUENCAS CERRADAS DEL NORTE
- 13 CUENCAS DE LOS RIOS NAZAS, AGUANAYAL Y DESQUITAL
- 14 CENTRO LERMA



REGIONALIZACION

FIGURA 1, 1.

T A B L A N o. 1

DISPONIBILIDAD DE AGUA POR HABITANTES EN LOS AÑOS 1980, 1990 y 2000.

Región Núm.	Nombre	Esgurrimiento total. Millones de m <sup>3</sup> .	Disponibilidad de agua m <sup>3</sup> /habitante/año.		
			1980	1990	2000
ESTADOS UNIDOS					
	MEXICANOS.	357,535	4,970	3,587	2,647
1	Península de Baja				
	California.	574	216	110	60
2	Noroeste.	33,708	6,151	4,383	3,223
3	Pacífico Centro.	11,333	5,812	4,359	3,373
4	Cuenca del Río Bal-				
	sas.	12,186	1,741	1,263	923
5	Pacífico Sur y Zona				
	Istmica.	75,199	18,431	13,900	10,547
6	Golfo Norte.	27,153	27,428	20,039	15,169
7	Golfo Centro.	27,398	8,698	6,539	5,009
8	Cuenca del Río Papa-				
	loapan.	41,135	19,086	14,535	11,178
9	Golfo Sur.	110,875	41,217	30,211	22,219
10	Península de Yucatán	3,685	2,440	1,861	1,445
11	Cuencas cerradas de				
	Chihuahua.	856	984	685	495
12	Cuencas cerradas del				
	Norte	160	77	55	45

Región Num.	Nombre	Esguerrimiento total. Millones de m <sup>3</sup> .	Disponibilidad de agua m <sup>3</sup> /habitante/año.		
			1980	1990	2000
13	Cuencas cerradas de los ríos Nazas, Aguanaval y Mezqui	2,303	1,272	1,010	889
14	Centro Lerma.	10,970	416	301	224

## I.2. Desequilibrio de los recursos hidráulicos por la explosión demográfica y contaminación ambiental de las grandes urbes.

La mala distribución de la población en el territorio ha sido uno de los problemas demográficos tradicionales del país. Sus antecedentes históricos son originados principalmente por los contrastes físico-climáticos del territorio, pues frente a pequeñas áreas dotadas de excelentes condiciones geográficas, hay extensas zonas donde, debido a una serie de factores adversos impuestos por la naturaleza, se dificulta el desarrollo de los grupos humanos.

México tiene una de las tasas de crecimiento demográfico más elevadas del mundo. En los últimos treinta años la población del país aumentó de 19.7 a 51.1 millones de habitantes, o sea, un aumento absoluto de 31.4 millones de personas y un aumento relativo de 159%. La tasa anual de crecimiento muestra un ritmo acelerado de aumento en la década de 1960-70 a 3.6%. En la década 1970-80 según el Censo Nacional ha declinado a 2.5%.

Estos resultados nos permiten ver un panorama real de los consumos de líquido, ya que en 1970 se contaba con una población de 51.1 millones de habitantes, con un consumo de agua anual de 2,450 millones de metros cúbicos; para el año 2,000 se tendrá una población de 135 millones de habitantes con un consumo anual de 22,700 millones de metros cúbicos de agua. En consecuencia, la disponibilidad de agua variará. En 1970 tuvimos una disponibilidad de agua por habitante de 6,998 m<sup>3</sup>/habitante/año; para el año 2,000 esta

disponibilidad bajará a 2,647 m<sup>3</sup>/habitante/año.

Otro de los factores de primordial importancia en el desequilibrio de nuestros recursos hidráulicos es la contaminación del agua debido a residuos químicos que muchas veces persisten aun después de tratamientos especiales evitando el fácil consumo del elemento en los diversos campos y aumentando su costo. En consecuencia la disponibilidad de agua por habitante disminuye.

La contaminación producida por el hombre afecta a los recursos hidráulicos de México, creando interferencias cada vez más graves en los diferentes usos del agua, que además de afectar la salud de la población se traducen en perjuicios económicos de mayor o menor cuantía.

Los ríos que cruzan las zonas sobrepobladas del altiplano y los que resuelven, en general, las más grandes necesidades de agua del país, han empezado a contaminarse en forma peligrosa, especialmente con los desperdicios de los centros de población de mayor importancia, en los que aparecen ciertos productos químicos, detergentes, etc., que subsisten parcialmente después de largos recorridos y aun después de hacer pasar el agua por plantas de tratamiento.

Actualmente, y de la misma manera que en los problemas anteriormente mencionados, se han llevado a cabo campañas para combatir la contaminación. En dichas campañas se persuade a la población para que sepa darles el valor que se merecen a los recursos

naturales y para que los conserve.

Un ejemplo de gran impacto es el documental de cine El agua y el hombre, en el que se describe este fenómeno de la contaminación.

Ante este panorama, es apremiante la necesidad de formular un estudio de carácter nacional de los recursos hidráulicos, que por primera vez relacione la variación normal en el abastecimiento de agua con el crecimiento de la población, así como la contaminación con la actividad económica, teniendo como objetivo establecer una estructura precisa de la relación disponibilidad-demanda-dotación a través de la nación y para toda clase de propósitos.

### I.3. Necesidad de recursos hidráulicos en la Península de Baja California.

Las zonas carentes de recursos hidráulicos, normalmente se encuentran en el subdesarrollo, ya que el agua es el elemento clave para elevar el nivel de vida de la población. Las entidades del territorio nacional ubicadas en las zonas áridas y semiáridas es donde más se acusa el subdesarrollo.

A medida que se vayan reduciendo las disponibilidades de agua por habitante, este líquido se convertirá en un recurso cada vez más escaso y algunas regiones entrarán en un período de crisis, crisis que tan sólo puede contrarrestarse adoptando medidas energéticas con toda oportunidad.

Una región con este tipo de problema es la Península de Baja California, lugar falto de desarrollo donde podemos aplicar alguna solución de la variedad que existe.

En este estudio, se tratará en particular de la Desalación de agua de mar como fuente potencial de recursos hidráulicos como uno de los factores más decisivos para lograr un desarrollo regional a corto plazo -del cual carece esta región- y que sin duda alguna es la actividad turística; ya que la mala calidad de los suelos cultivables determinan barreras infranqueables para un desarrollo económico futuro.

Por lo tanto, se trata de promover y desarrollar un centro turístico de primera magnitud, que llevará el nombre de "ATLACANI",

cuyo origen son las voces nahuatl "Atl" (agua) y "Zacani"(acarreador). Este centro logrará un incremento sustantivo de la actividad económica turística en el Océano Pacífico, con los beneficios que ello representará para el país en su conjunto.

## CAPITULO II. REGION DONDE SE UTILIZARA LA PLANTA DESALADORA.

### II.1. Localización.

### II.2. Recursos.

- a). Orografía.
- b). Hidrografía.
- c). Climatología.
- d). Flora y fauna.
- e). Vías de comunicación.
- f). Suministro de energía eléctrica y combustibles.

### II.3. Destino de la comunidad.

### II.4. Población.

- a). Capacidad turística.
- b). Población flotante.
- c). Población de apoyo.
- d). Población futura.

### II.5. Consumo de agua.

### II.6. Fuente de abastecimiento.

### II.7. Selección del método de desalación.

## II.1. Localización.

Se localizará la ciudad en el sur del Estado de Baja California Norte, en el paralelo  $29^{\circ}13'$  de latitud y el meridiano  $114^{\circ}46'$  de longitud Oeste de Greenwich. (Ver fig. II,1.).

Existe una distancia del centro de la ciudad a la costa de 2.5 Km. y se conecta a la carretera Transpeninsular en 25 Km.

Se encuentra aproximadamente a 40 Km. del poblado de Punta Prieta y a 60 Km de la población de Laguna de Chapala.

## II.2. Recursos.

### a). Orografía.

La Península de Baja California tiene, en sentido longitudinal, cadenas montañosas muy próximas al litoral del Mar de Cortés. En la vertiente occidental las montañas, descienden hacia la costa del Pacífico en suave declive, originando valles extensos.

### b). Hidrografía.

En la Península hay muy pocos ríos permanentes. Dispone de 1,950 millones de metros cúbicos de agua superficial, de éstos, 1,850 corresponden al Río Colorado; el resto se debe a los aprovechamientos actuales, o futuros, a las presas y a la planta desaladora de Rosarito.

Los acuíferos subterráneos se han estimado, a su vez, en 1,000 millones de metros cúbicos, de los cuales 700 se encuentran en el Valle de Mexicali. De lo que se deduce que la mayor parte

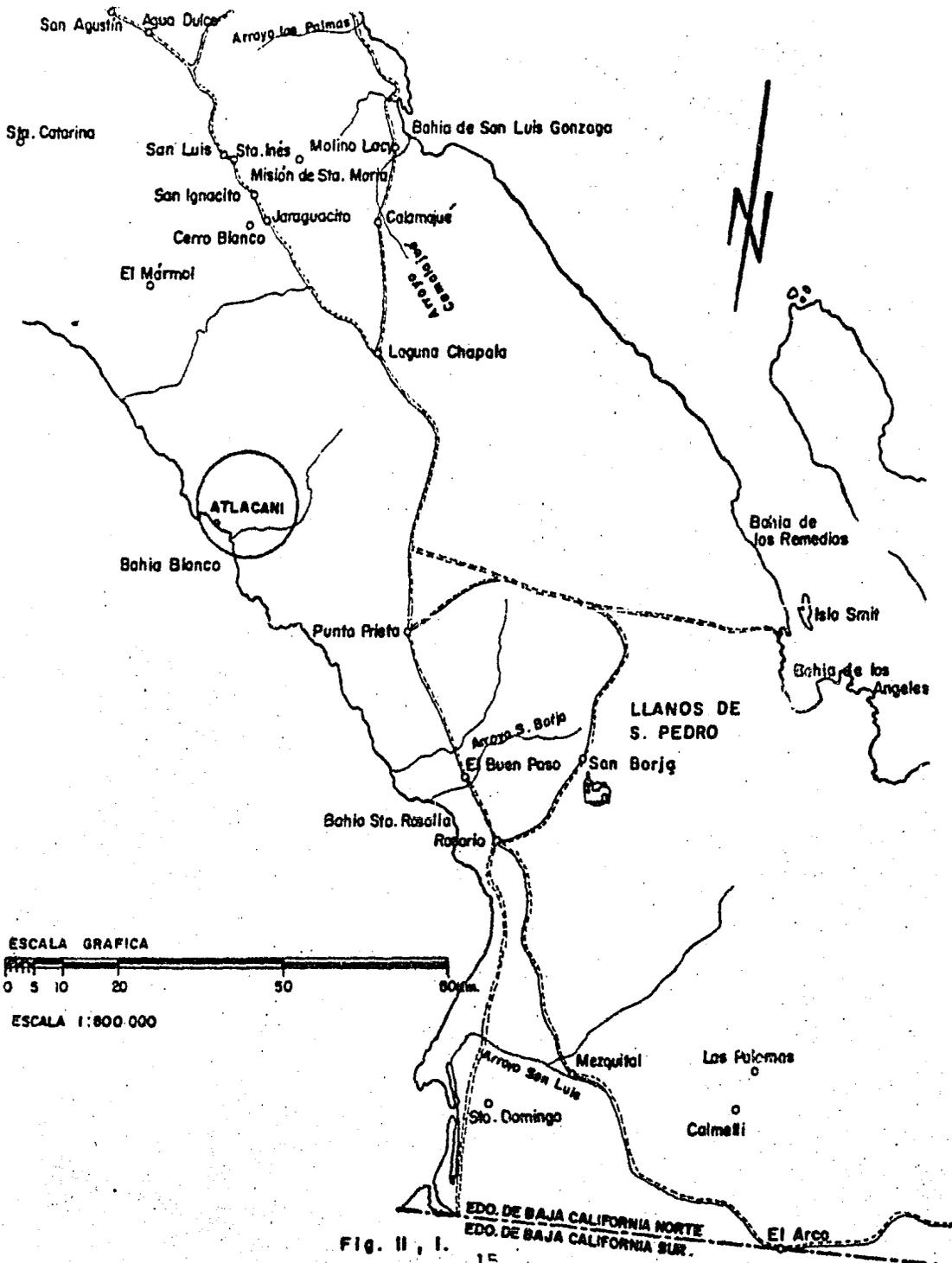


Fig. II, I. 15

del agua disponible se encuentra en la zona del Valle de Mexicali, que representa el 4% del territorio y cuenta con el 90% del agua existente.

Por lo expresado anteriormente, se puede ver que la zona donde se ubicará la ciudad carecerá casi totalmente del líquido.

#### c). Climatología.

El clima es en general caliente y seco, aunque por estar al Norte del Trópico de Cáncer tiene una estación del año fría y muy marcada.

En invierno recibe vientos monsonicos del Noroeste y en verano del Sureste: aquéllos, secos y fríos, se presentan entre noviembre y marzo con temperaturas bajas, éstos son húmedos y producen lluvias irregulares.

La precipitación pluvial es de 300 mm.

La temperatura media anual es de 25°C; siendo la del mes más frío de 8°C.

#### d). Flora y fauna.

La vegetación es esteparia y desértica. Entre sus ejemplares predominan los arbustos, de los que podemos mencionar los siguientes: tabaquillo, palo de arco, mezquite, y varias especies de ágave.

Las especies de la fauna son muy variadas. Se pueden men

cionar las más importantes entre las aves: cisne chiflador, o trompetero, pato cuaresmeño, o cucharón, pato golondrino, pato copetón, águila real, halcón, águila pescadora, tórtola, lechuza, correcaminos, gorrión. Entre los mamíferos están: topo, liebre, conejo, puma, gato montés, coyote, zorra, tejón, venado cola negra, berrendo y borrego cimarrón.

Entre las principales especies marinas se encuentran las focas, y más alejadas de la costa están las ballenas. De peces se encuentran gran variedad comestible.

e). Vías de comunicación.

La ciudad se unirá a la Transpeninsular por medio de una carretera pavimentada de 25 Km. Contará con un aeropuerto para aviones pequeños que la conectará con Tijuana y Mexicali.

También contará dentro de sus servicios con puerto para yates.

f). Suministro de energía eléctrica y combustibles.

Los programas de electrificación que lleva a cabo la Comisión Federal de Electricidad ha logrado cubrir la necesidad de la Península, por lo que la ciudad no tendrá problemas en cuanto al suministro de energía eléctrica. Con respecto a los combustibles, el suministro se podrá efectuar por vía marítima y terrestre; por lo tanto este aspecto estará también solucionado.

### II.3. Destino de la comunidad.

Viendo el panorama de la comunidad, se puede observar, en relación con el sector agropecuario, la mala calidad de los suelos cultivables, la inexistencia de escurrimientos superficiales y las características semidesérticas del lugar, lo que limitan seriamente las posibilidades de ampliar la frontera agrícola. El clima caliente y seco hace, por su parte, altamente cuestionable la posibilidad de desarrollo ganadero en cualquiera de sus formas.

No parece conveniente, en consecuencia, postular a este sector como soporte del desarrollo económico futuro.

Algo similar ocurre con el sector forestal por las características desérticas de la región.

Por diversas razones históricas, relacionadas éstas con el modelo concentrador del desarrollo del país, y pese a tener la Península de Baja California frontera con los Estados Unidos de Norteamérica, el sector industrial no ha logrado un nivel de desarrollo relevante.

La abundancia de recursos pesqueros y su variedad pueden llegar a constituir, por su parte, un paso sólido para la industrialización regional de todo el litoral de la península, en la medida en que se resuelvan los problemas de accesibilidad a los principales puertos pesqueros. Se propone intensificar la pesca de altura y la infraestructura necesaria en materia de astilleros, frigoríferos y empacadoras.

El turismo, entendido como sector económico, es quizá el factor más decisivo para lograr un desarrollo regional a corto plazo. Bastante se ha escrito acerca de la posición geográfica privilegiada de la península, ubicada cerca de los Estados Unidos de Norteamérica, y teniendo en cuenta que la ciudad de Tijuana recibe un promedio de once millones de turistas extranjeros al año. Asimismo, tenemos que Ensenada, Guerrero Negro y Cabo San Lucas forman un cinturón turístico de enorme potencial, pero insuficientemente desarrollado para atraer una proporción mayor de visitantes, lo que se estima se puede lograr en corto plazo si se crean nuevos complejos turísticos.

El panorama económico regional descrito constituye el marco en el que se sitúan las perspectivas de desarrollo de la Península de Baja California. Las acciones que se realicen para el desarrollo de proyectos turísticos deben tener en cuenta los diferentes ecosistemas, evitando la destrucción de la flora y de la fauna marina y terrestre.

Por lo tanto, el destino de Atlacani será el de un centro turístico con servicios de primera que active el flujo de visitantes con beneficios atractivos para la economía no sólo del lugar sino de la península, la cual apoyará su desarrollo en el turismo. (Ver fig. II,2.)

La realización del proyecto supone resolver diversos problemas de infraestructura, como es el suministro de agua dulce, ya que es el principal factor que limita el crecimiento demográfico y

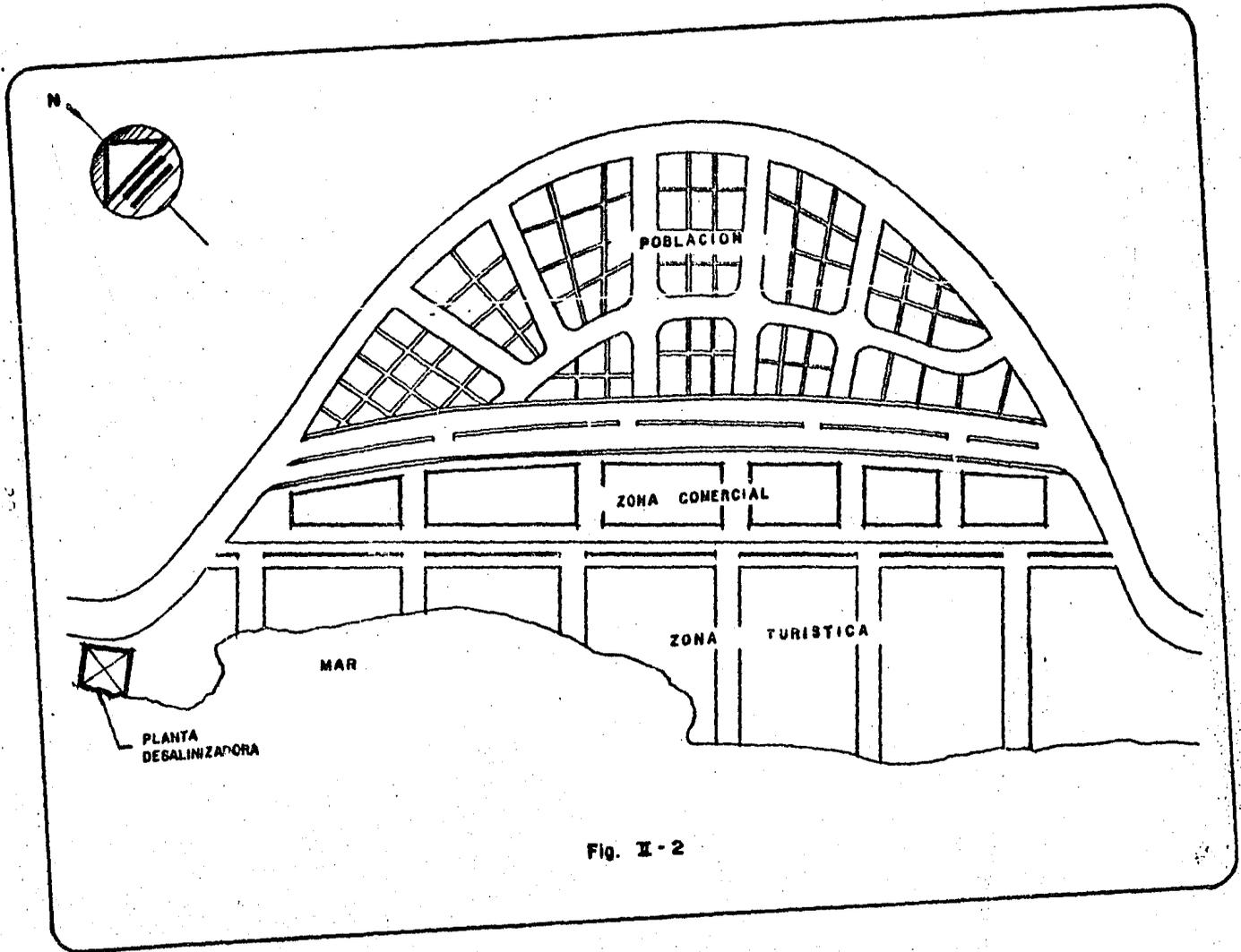


Fig. I - 2

el incremento de la corriente turística.

#### II.4. Población.

##### a). Capacidad turística.

Como esta población es nueva, la definiremos inicialmente en base a las instalaciones hoteleras con que va a contar en su inicio. Posteriormente, se definirá su población futura de acuerdo al método gráfico de comparación con otras poblaciones.

Para su población inicial se hizo un estudio aproximado de la capacidad hotelera, considerándose que al principio se contará con 350 cuartos de hotel, 400 de condominio y 250 terrenos para casas de veraneo.

##### b). Población flotante .

A continuación se hace un cálculo de la afluencia de turistas hospedados tanto en hoteles, condominio y casa de veraneo que se conoce como población flotante.

Según datos obtenidos en la Secretaría de Turismo se tiene un promedio de ocupación en cuartos para dos personas en hotel, en condominios y en casas de veraneo para seis personas. Con esta información se elaboró la Tabla No. 2, para determinar la población flotante con que se iniciará este complejo turístico.

T A B L A N o. 2

P O B L A C I O N F L O T A N T E

C o n c e p t o	Núm de cuartos o viviendas.	Habitantes por cuartos o vi - vienda	Población flotante
Hoteles	350	2	700
Condominios	400	6	2,400
Terrenos	250	6	1,500
T o t a l	1,000		4,600

c). Población de apoyo .

Para dar servicio al turismo se necesitará de cierta cantidad de empleados y éstos, a su vez, deberán tener vivienda para sus familiares lo que formará el núcleo que se conoce como población de apoyo. Se calcula que por cada cuarto de hotel se generan tres empleos, por cada vivienda en condominio dos empleos y uno por cada casa de veraneo.

Con los anteriores datos conformamos la Tabla No. 3, la que proporciona el número de empleados necesarios.

T A B L A N o. 3

P O B L A C I O N D E A P O Y O

C o n c e p t o	Núm.de cuartos o viviendas.	Empleos por cuar to o vivienda.	Núm. de empleos.
Hoteles.	350	3	1,050
Condominios.	400	2	800
Terrenos.	250	1	250
T o t a l			2,100

Considerando tres familiares por empleado, el total de la población de apoyo será:

$$2,100 \text{ empleos} \times 3 \text{ familiares} = 6,300 \text{ habitantes.}$$

d). Población futura.

Con el fin de conocer las necesidades de agua potable de la población futura del centro turístico "Atlacani" para el año 2,020, se utilizará el método de comparación con otras poblaciones, ya que la población es nueva y obviamente, no hay censos anteriores a la creación de dicho centro.

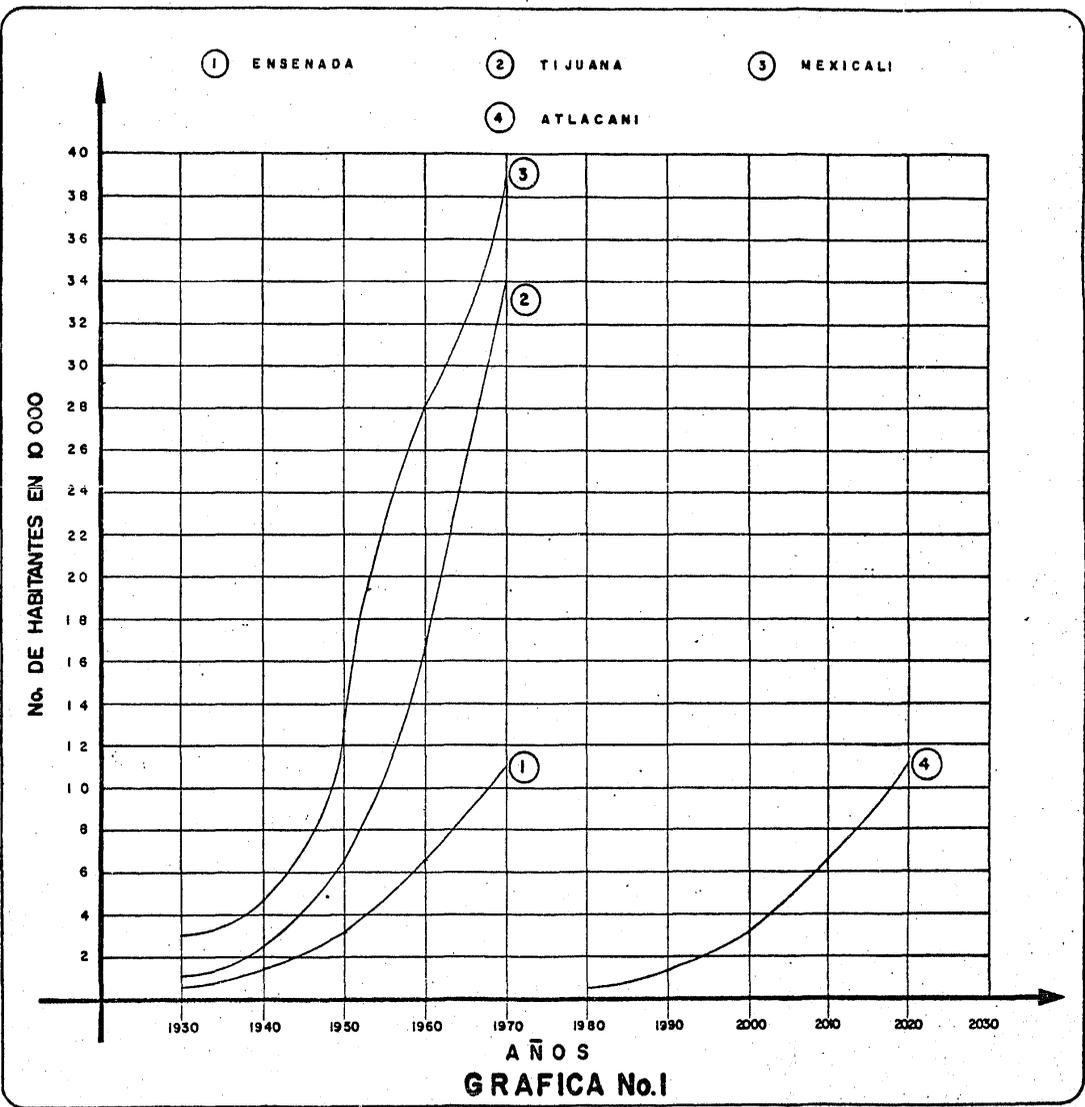
En el método antes citado se requiere de dos o más pobla dos semejantes en costumbres, actividades, economía y clima a la población de "Atlacani", a la que se trata de calcular el número

futuro de habitantes.

Es necesario que las poblaciones elegidas tengan mayor número de habitantes, y suponer que la población en estudio crecerá como lo hicieron aquéllas. Gráficamente se llevarán paralelas de los crecimientos de las poblaciones en comparación al punto de inicio de la población en estudio, escogiendo la que mejor siga la gráfica de crecimiento observada, o a la que mejor se apegue según los factores previstos.

De acuerdo con los datos obtenidos de la Dirección General de Estadísticas, se escogió el Estado de Baja California Norte las siguientes poblaciones: Tijuana, Mexicali y Ensenada.

Con los datos anteriores se elaboró la gráfica No. 1.



GRAFICA No.1

Como se puede observar, la curva de población en estudio se llevó paralela a la curva de crecimiento de la ciudad de Ensenada, teniendo en cuenta que esta última es semejante en más aspectos a "Atlacani" que las otras dos ciudades. Ensenada está más alejada de la frontera, es costera, turística y con clima similar a la población en estudio, por lo que el crecimiento demográfico es menos explosivo que el de Tijuana y de Mexicali, ciudades que están localizadas en la frontera y tienen un incremento de población más acentuado.

#### II.5. Consumo de agua.

En los centros turísticos se suele tener una dotación mayor de agua potable que en poblaciones de otras actividades económicas. Así pues, se consideró como dotación 600 lt./hab./día., que multiplicada por la población inicial nos dará el consumo de agua en lt./día.

Esto es:

Población de apoyo.	6,300
Población flotante.	<u>4,600</u>
	10,900 habitantes.

$$10,900 \text{ hab.} \times 600 \text{ lt./hab./día} = 6'540,000 \text{ lt./día.}$$

#### II.6. Fuente de Abastecimiento.

Este consumo necesario para la población se podrá dotar directamente del agua de mar; ya que México cuenta con 10,00 Km.

de litorales -y en particular la península- que nos proporcionan un volumen incalculable de este líquido como fuente inagotable para la producción de agua dulce.

## II.7. Selección del método de desalación.

La opción para obtener agua dulce de otros lugares, por ejemplo del Valle de Mexicali, para esta ciudad de Atlacani se descartó, ya que la conducción, perforación y transporte aumentan sus costos considerablemente.

Por lo tanto, el gasto de agua a producir y la concentración de sales del agua de mar en esta región, son factores determinantes para optar por la desalación como solución al abastecimiento de agua en las necesidades nacionales presentes y futuras, ya que sus actividades en la investigación y desarrollo han creado confianza y reconocimiento en el mercado.

## CAPITULO III. SELECCION DEL PROCESO.

### III.1. Clasificación.

### III.2. Descripción de los procesos.

- a). Procesos basados en evaporación-destilación.
  - Evaporación solar.
  - Evaporación súbita en múltiples etapas.
  - Compresión de vapor.
- b). Procesos basados en membranas.
  - Osmosis inversa.
  - Electrodialisis.

### III.3. Parámetros a considerar para la selección del proceso.

- a). Características del agua de alimentación.
- b). Pretratamiento del agua de mar.
- c). Pureza requerida del producto o destilado.
- d). Fuente de energía externa de la planta.
- e). Mano de obra.
- f). Capacidad requerida de la planta desaladora.

### III.4. Selección del proceso más viable.

### III.5. Descripción del proceso de evaporación súbita en múltiples etapas.

### III.1. Clasificación.

Actualmente existen diferentes procesos para la desalación del agua de mar. Sin embargo, a través de los años la tecnología ha demostrado que no todos presentan características aceptables para su aplicación práctica y económica.

La clasificación que se menciona seguidamente, tiene su fundamento en los aspectos fisicoquímicos de las aguas saladas.

Estas aguas se presentan como soluciones compuestas por un soluto y un solvente, es el primero las sales y, el segundo, el agua.

Clasificación de los procesos para desalar agua.

#### 1. Evaporación- destilación.

Evaporación solar.

Evaporación súbita en múltiples etapas.

Compresión de vapor.

#### 2. Membranas.

Osmosis inversa.

Electrodiálisis.

Se han seleccionado, para describirlos, los procesos con mayor aceptación y aplicación actual. Este es el caso de los procesos basados en la evaporación—destilación y membranas.

### III.2. Descripción de los procesos.

#### a). Procesos basados en la evaporación-destilación.

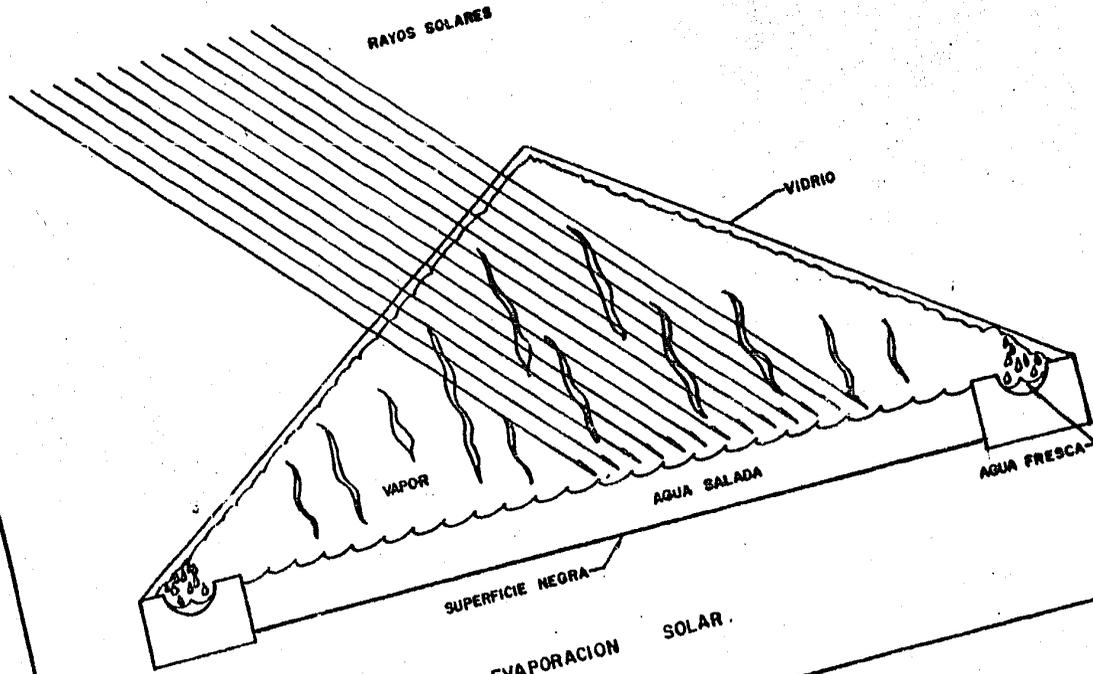
La destilación es un proceso de separación en el cual un líquido se convierte en vapor y éste se condensa más tarde en líquido. A este líquido de condensación se le da el nombre de "destilado". La destilación es, pues, combinar la evaporación y la condensación, y la finalidad más corriente de destilar es la de purificar o separar los componentes de una mezcla. Es la operación clave para separar una solución salada del agua.

- Evaporación solar.

Es uno de los procesos más sencillos y prácticos que se conocen: se basa en la evaporación que sufre el agua. Este procedimiento se apoya en la división que sufre la energía solar al ponerse en contacto con una superficie. La división se realiza en tres partes: una es absorbida, otra reflejada y, la restante, transmitida.

El destilador solar es un aparato que tiene un techo de vidrio y, a través del cual, pasan los rayos solares. Esta energía solar es absorbida por la superficie del fondo del destilador, que al calentarse incrementa la temperatura del agua y, posteriormente, ésta se evapora. La temperatura del techo del destilador solar permanece más baja que la del vapor de agua; esta diferencia de temperaturas produce la condensación en forma de gotas de agua, las que escurren hacia las charolas colectoras. (Ver fig. III.1.).

La ventaja de este procedimiento es que la energía requerida es gratis; su desventaja, obviamente, es que esta energía depende de la intensidad de los rayos solares, la cual varía con la



EVAPORACION SOLAR.

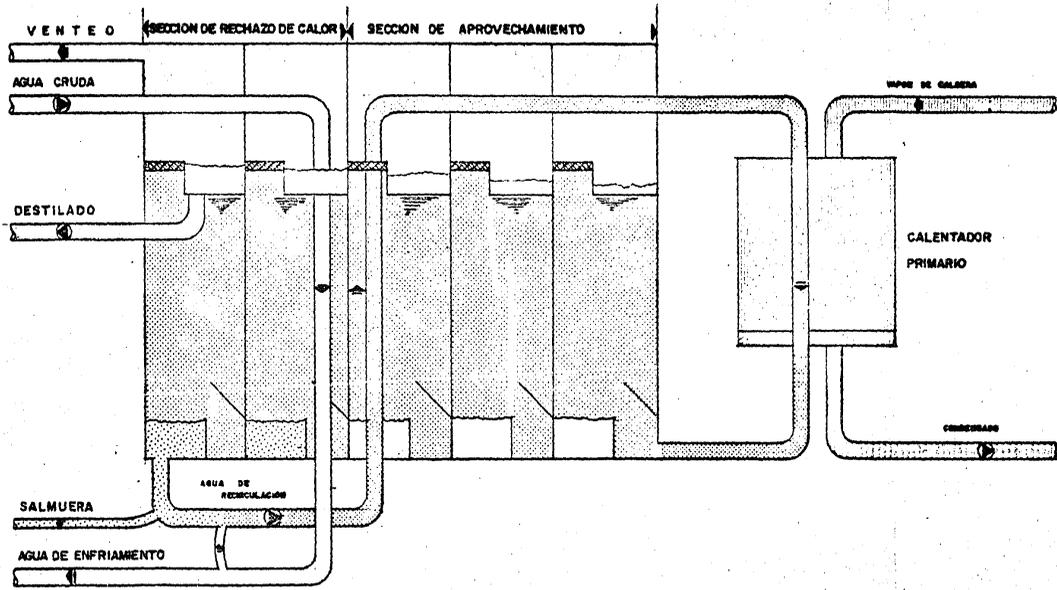
FIG. III, 1.

localización geográfica, época del año y condiciones climatológicas.

- Evaporación súbita en múltiples etapas.

El principio de la operación de este proceso se basa en que el agua hierve cuando, simultáneamente, se alteran la temperatura y la presión; es decir, hierve a temperaturas menores si es sometida a presiones menores. El proceso de evaporación súbita o instantánea se lleva a cabo debido a una reducción de presiones. Lo anterior se explica en una serie de etapas sujetas a una reducción de presiones progresivas en que, parte de la salmuera introducida en cada etapa, se evapora súbitamente cuando su temperatura logra encontrarse en equilibrio termodinámico con la presión de vapor existente de esta etapa. (Ver fig. III, 2.). El vapor producido por la corriente de la salmuera es interceptado y condensado por el haz de tubos de condensación, cediendo, al mismo tiempo, calor al agua fría que fluye en el interior de los tubos. A medida que esto sucede, el agua fría se calienta y logra así la conservación de la mayor parte de energía.

Este proceso es el más apropiado para la transformación en agua dulce de las aguas del mar, pues a pesar de sus limitaciones debido a problemas de corrosión y mano de obra especializada, su diseño, costos de operación, mantenimiento, al igual que otros aspectos del proceso, todos están perfectamente determinados.



EVAPORACION SUBITA MULTIPLES ETAPAS

Fig. III, 2.

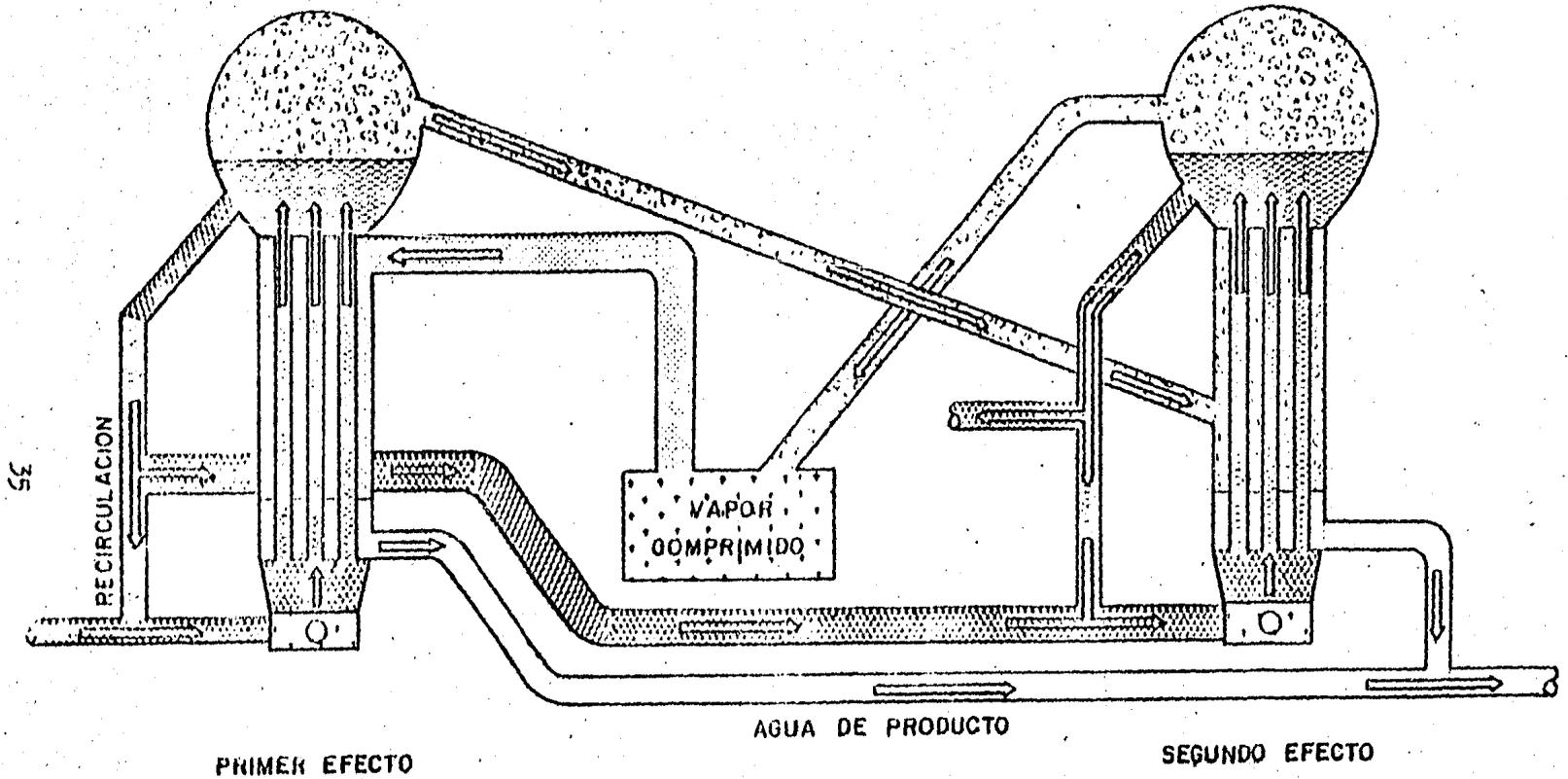
- Compresión de vapor.

El principio de este proceso tiene su fundamento en que: ha medida que el vapor se comprime aumenta su presión y temperatura, disminuyendo, en consecuencia, su volumen.

En la fig. III, 3 fácilmente se comprende el párrafo anterior. Primeramente el agua del mar es precalentada en un intercambiador, donde recibe calor de la salmuera de rechazo y del producto destilado proveniente del evaporador. Después que el agua del mar es precalentada y entra en el evaporador, donde se desprende el vapor que, posteriormente, es succionado por el compresor, el cuál eleva la presión del vapor hasta su correspondiente temperatura de saturación, expulsándolo más tarde por el exterior del haz de tubos del evaporador.

Así, el vapor cede calor a la solución en ebullición al ponerse en contacto con los tubos, logrando generar más vapor y condensándose para formar el destilado. Tanto el destilado como la salmuera concentrada fluyen del evaporador al intercambiador, precalentando el agua del mar alimentada. Los diseños de este proceso se utilizan para construir plantas tipo "Paquete". La energía utilizada para su operación puede ser eléctrica, combustibles o vapor. Su aplicación en el mercado es múltiple, ya sea en campamentos, barcos, plataformas de operación, embotelladoras, etc.

Uno de los principales problemas de este sistema es el diseño del compresor, sobre todo cuando se manejan grandes volúme-



DESTILACION POR COMPRESION DE VAPOR

Figura III, 3

nes de vapor.

b). Procesos basados en membranas.

- Osmosis inversa.

El fenómeno de ósmosis inversa depende de una "membrana semipermeable" que permite el paso de algunos componentes de una solución, mientras que a otros componentes los retiene.

El procesos en general, se puede explicar a través de una membrana semipermeable que separa dos soluciones de diferentes concentraciones. La solución menor tenderá a la igualdad de concentraciones con la otro por medio de un flujo de solvente. A este fenómeno se le conoce como ósmosis.

La base del proceso de ósmosis inversa radica en aplicar una presión de equilibrio (llamada presión osmótica) a solución más concentrada para evitar así el flujo osmótico. Esta presión se incrementa hasta lograr un flujo de solvente inverso hacia la solución menos concentrada. (Ver fig. III,4.).

En el mercado usualmente existen varios diseños que son: arreglo de placa y marco, arreglo tubular, arreglo espiral y fibra hueca. Todos ellos basados en este principio de la membrana, la cuál es una película flexible de plástico que, corrientemente no tiene más de 4 a 6 mm. de espesor y está acondicionada para resistir las grandes presiones a que se ve sometida. El material más usual en la fabricación de membranas es el acetato de celulosa;

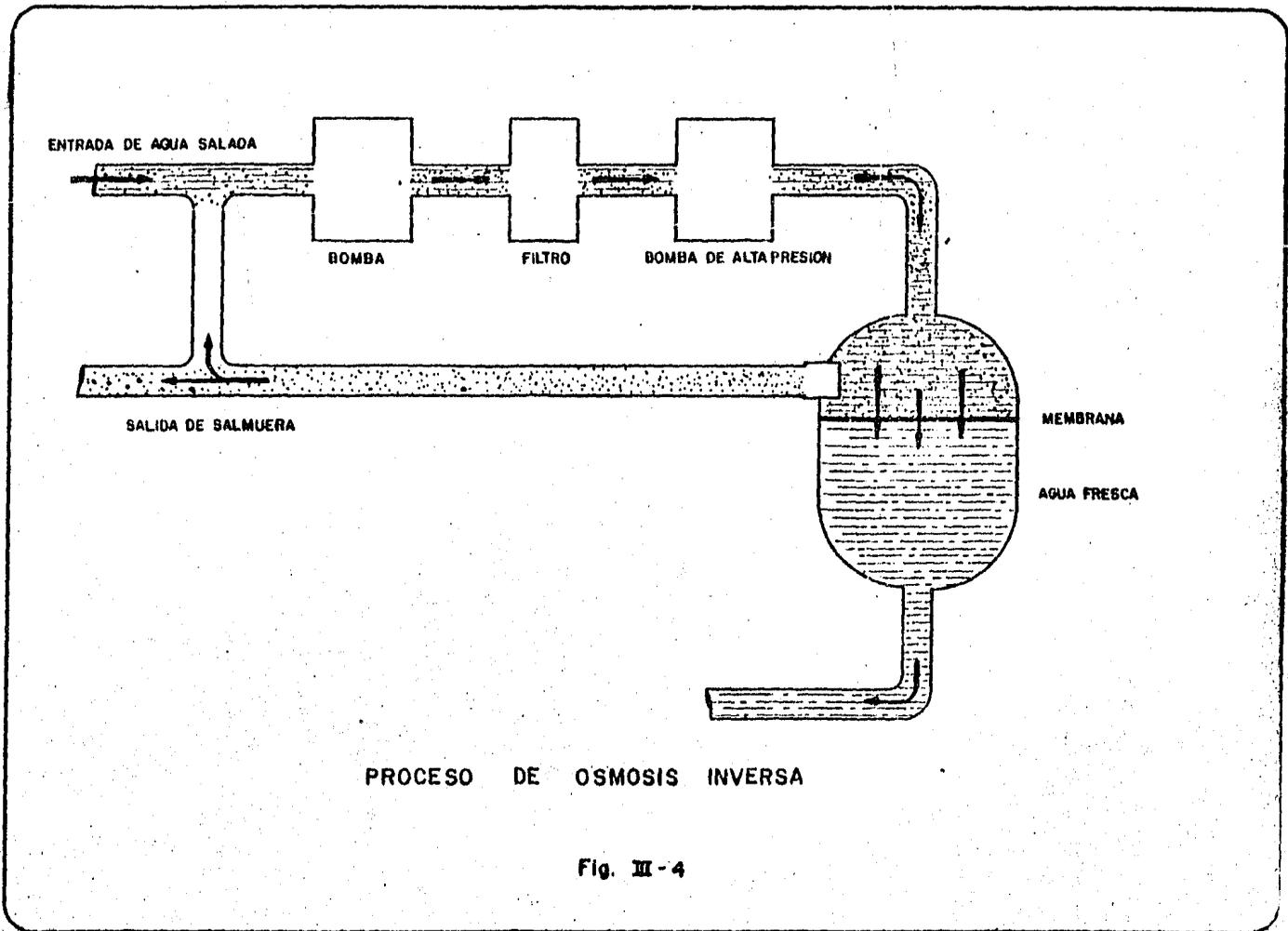


Fig. III-4

pero cabe aclarar que existen otros materiales que se utilizan en su producción.

Algunas de las ventajas importantes de este proceso es el bajo consumo de energía, puesto que sólo gasta la energía eléctrica precisa para impulsar las bombas. El equipo del proceso es simple y la operación a temperatura normal reduce al mínimo los problemas de corrosión reflejándose las características anteriores en un costo bajo.

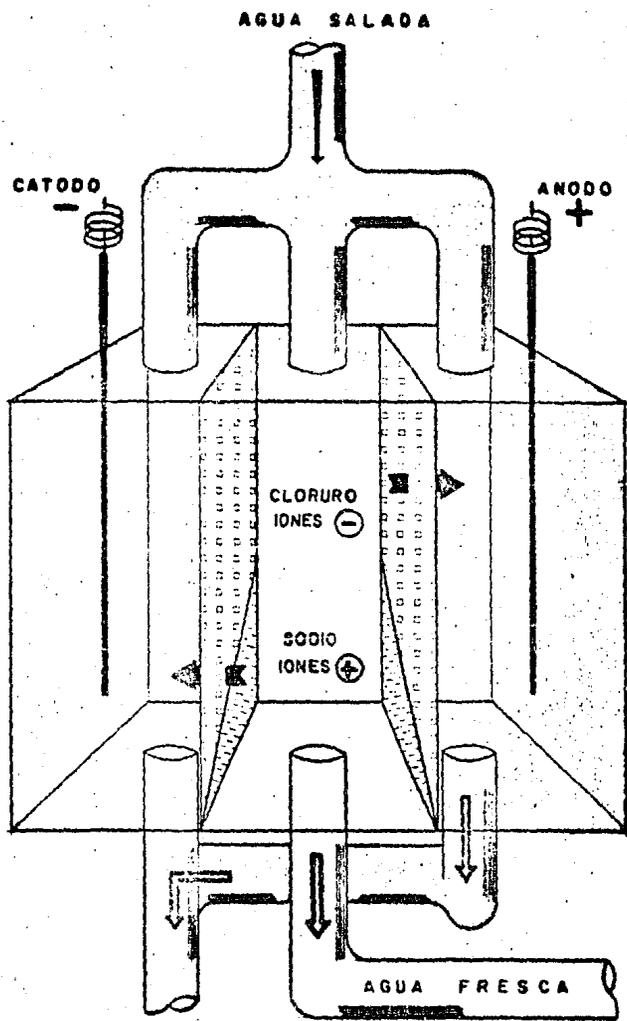
Sin embargo, el diseño que hemos descrito únicamente funciona con eficiencia para el tratamiento de aguas salobres, aunque el campo de la investigación está encaminado para lograr el tratamiento de las aguas del mar.

#### - Electrodialisis.

Al hablar de electrodialisis podemos definirla, en general, como el transporte de iones a través de membranas como resultado de una fuerza o potencial eléctrico.

El proceso de electrodialisis se presenta en la fig.

III,5, en la que se muestra una celda que tiene dos tipos diferentes de membranas, una que deja pasar los iones positivos (cationes), llamada membrana de intercambio catiónico, y otra, que permite sólo el paso a iones negativos (aniones), denominada membrana de intercambio aniónico. La solución a tratar fluye a través de los compartimientos formados por las dos membranas, en donde los electrodos (cátodo y ánodo) ocupan los extremos. Al someterse el sis-



**SIMBOLOGIA:**

 AGUA SALADA

 ELECTRODOS

 AGUA FRESCA

 MEMBRANAS

**FIG. III, B.**  
**PROCESO DE ELECTRODIALISIS**

tema a una descarga de corriente eléctrica, los aniones (iones negativos) se van hacia el ánodo (electrodo cargado positivamente) y los cationes (iones positivos) son transferidos hacia el cátodo (electrodo cargado negativamente) dejando libre el agua dulce entre las dos membranas.

Una de las principales ventajas de este sistema, al igual que la ósmosis inversa, es el gran ahorro de energía para llevar a cabo el tratamiento, ya que éste se efectúa sin cambio de fase en la solución, por lo que también hay menor problema de corrosión.

Sin embargo, su campo de aplicación se encuentra en aguas salobres de bajo contenido de sales (2,000 ppm).

### III.3. Parámetros a considerar para la selección del proceso.

#### a). Características del agua de alimentación.

Al elegir un sistema de desalación para el suministro de agua, deben de considerarse varios factores para su instalación y operación. Entre los múltiples problemas que se tienen que superar, se encuentran los relacionados con las características del agua de alimentación, siendo estas características las siguientes: la concentración de sales, su composición y temperatura.

La concentración salina del agua de alimentación puede variar, influyendo definitivamente en la eficiencia práctica del proceso.

En particular, en la planta de Atlacani se tendrá como fuente de abastecimiento las aguas del mar, ya que la planta se ubicará en la costa.

El análisis fisicoquímico del agua se observará en la forma siguiente:

# ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE AGUA

REGISTRO No. _____
PROYECTO _____

SOLICITADO POR _____	Fecha _____
Localidad _____	Estado _____
Fuente <b>ANÁLISIS TÍPICO AGUA DE MAR S.C.S.</b>	Costo \$ _____

CARACTERES FÍSICOS	
Temperatura (10-15 °C) _____	24 °C
pH (6.0-8.0) _____	8.1
Color (Max. 10 U Pt-Co) _____	Turbiedad (Max. 5 UTP) _____
Conductividad específica (µmhos/cm) _____	81000
ppm NaCl _____	31700
Sólidos totales (500-1000 ppm) _____	3510
Sólidos disueltos (ppm) _____	3510

## DETERMINACIONES (NORMAS EN ppm)

	ppm	MEQ/L		ppm	MEQ/L
Dureza de calcio (CaCO <sub>3</sub> )	1000		Alcalinidad fenolftaleína (CaCO <sub>3</sub> 500)	0	
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> 200)	8600		Alcalinidad total (CaCO <sub>3</sub> 400)	121	

Cloruros (Cl <sup>-</sup> 250)	19740	Calcio (Ca <sup>++</sup> )	400
Sulfatos (SO <sub>4</sub> 250)		Magnesio (Mg <sup>++</sup> 125)	1344
Fosfatos (PO <sub>4</sub> 4)	.006	Sodio (Na + 400)	11000
Fluoruros (F <sup>-</sup> 1.5)		Potasio (K <sup>+</sup> )	
Silica (SiO <sub>2</sub> )		Hierro (Fe <sup>+++</sup> 0.3)	
Bicarbonatos (HCO <sub>3</sub> )	148	Cobre (Cu <sup>++</sup> )	
Carbonatos (CO <sub>3</sub> )		Plomo (Pb <sup>++</sup> 0.1)	
Oxhidrilos (OH <sup>-</sup> )		Amoníaco (NH <sub>4</sub> 0.5)	
Nitratos (NO <sub>3</sub> 48)		OTROS:	
Nitritos (NO <sub>2</sub> 0.2)			
OTROS:			

Oxígeno disuelto (O <sub>2</sub> )		Materia orgánica	
Óxido de carbono (CO <sub>2</sub> )		Demanda de cloro (Cl)	
Ácido sulfhídrico (H <sub>2</sub> S)		Cloro residual (Cl)	

pH = 8.1 °C = 18

OBSERVACIONES \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
JEFE DE LABORATORIO

CONFORME

\_\_\_\_\_  
JEFE DE DEPARTAMENTO

Una vez que se tienen los datos antes indicados, se considera qué pretratamiento se le va a dar al agua, para evitar así que las sales disueltas se cristalicen y se precipiten formando incrustaciones en el equipo. Por consiguiente, los métodos para prevenirse de esas incrustaciones son elementos de gran importancia en el éxito del proceso.

Los efectos perjudiciales de las incrustaciones se previenen por medio de los tratamientos.

Deben tenerse presente algunas reglas en la aplicación de los procesos, reglas que conciernen a la composición del agua. Las más importantes son:

El agua de alimentación debe contener menos de 600 ppm de calcio. Asimismo, si la salmuera de desecho arroja una concentración de calcio menor a 440 ppm, no es menester un tratamiento que prevenga la precipitación del sulfato de calcio.

Dentro de la variedad de factores que alternan en la composición del agua de alimentación, se enlistan también la presencia de sílice, fierro, arsénico, bromo, mercurio, aceites o hidrocarburos.

Concluyendo: las aguas blandas como fuente de alimentación favorece la operación y economía de los procesos de destilación. Generalmente se hace un análisis del agua de alimentación al diseñar el equipo para prevenir las anomalías expuestas anteriormente.

Otro factor que incurre en la economía de los procesos es la temperatura adecuada del agua de alimentación. En general, las temperaturas del agua de abastecimiento varían de 20°C a 42°C, teniendo que igualar el calor que requieren las desaladoras.

En los procesos de evaporación súbita en múltiples etapas, la economía térmica se beneficia si se dota al agua de alimentación más fría.

b). Pretratamiento del agua de mar.

Cuando el agua de mar es calentada, algunas de las sales disueltas se cristalizan y precipitan de la solución formando incrustaciones en las superficies de transferencia de calor, afectando a la operación y eficiencia de la planta.

En particular, las características de agua de mar en el análisis, proporciona una temperatura de agua de mar de 24°C que es abajo de los 90°C; por lo tanto, las incrustaciones que sufrirá el evaporador serán primordialmente de carbonato y bicarbonato de calcio.

Desde el punto de vista anterior, para prevenir estas incrustaciones alcalinas se opta por el tratamiento con ácido sulfúrico que es el más confiable de los que existen en el mercado contra este problema. Este consiste en tratar al agua de mar cruda con ácido para descomponer y romper los bicarbonatos. Es decir, elimina la fuente de iones carbonato e hidróxido que de otra manera se combinan con la dureza del agua para producir las incrustaciones.

nes mencionadas.

El ácido sulfúrico de concentración comercial, es el utilizado en la generalidad de los casos para este propósito, y se inyecta normalmente en la línea de alimentación de agua de mar. Una vez efectuándose la acidificación del agua de mar, se forma el bióxido de carbono que por su carácter ácido es corrosivo para los materiales de construcción de la desaladora pero que es removido en el descarbonatador.

Con este tratamiento, se puede operar a temperaturas hasta  $120^{\circ}\text{C}$ , lográndose factores de economía hasta de 12:1; además, que el costo de capital por unidad de capacidad de producción instalada, es generalmente menor para la planta con tratamiento de ácido.

Por lo tanto, las plantas con tratamiento de ácido tienen buena confiabilidad y vida esperada de equipo, siempre y cuando se mantenga un buen control del pH; es decir, se necesita una vigilancia continua por parte del personal de operación y mantenimiento para mantener el proceso dentro de los límites especificados y controlar adecuadamente el almacenamiento de material peligroso (ácido).

c). Pureza requerida del producto o destilado.

Después de llevarse a cabo el proceso de destilación, el flujo producto se dirige a un postratamiento, siendo aquí mezclado con agentes químicos adecuados para darle al destilado un ajuste y

estabilización de su pH y así cumplir con los requerimientos de calidad deseados.

Cuando se desea que el uso final del destilado sea para el consumo humano -como ocurre con las necesidades de la ciudad Atlacani-, la calidad del destilado puede variar de 0 a 1000 ppm de sólidos totales disueltos.

Los procesos de destilación producen agua de menor concentración que la que tradicionalmente se utiliza para el consumo humano. Esta agua se encuentra en el rango de 2 a 50 ppm de sólidos totales disueltos. En estas circunstancias, algunas veces se puede mezclar un poco de agua de alimentación con el destilado, pero el riesgo es que las impurezas del agua de abastecimiento vuelvan a introducirse en el producto final.

Por lo tanto, el agua producto de los procesos de destilación tiene la ventaja de mezclarse con otras fuentes y así elevar la calidad deseada del agua.

d). Fuente de energía externa de la planta.

Como fuente de energía se utilizará el diesel, que es uno de los combustibles más económicos y con la suficiente demanda que permite a Petróleos Mexicanos surtirlo.

e). Mano de obra.

Generalmente, en los diferentes tipos de procesos de desalación, no varía el número de personal que se necesitan para la

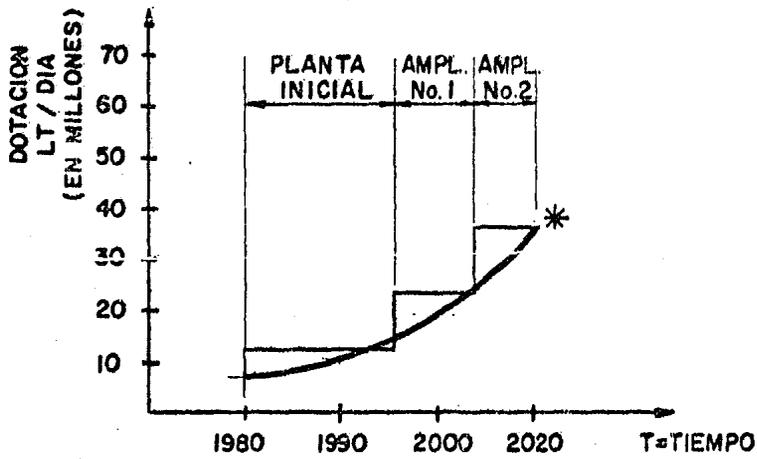
operación del sistema.

Se puede contar con personal adecuado para el funcionamiento de la planta, capacitando a personas de la localidad sin que ello pueda crear grandes problemas, únicamente el responsable de la operación será un técnico altamente capacitado, o bien un ingeniero.

f). Capacidad requerida de la planta desaladora.

En el capítulo II, se obtuvieron las necesidades iniciales de agua para la población, que es de 6'540,000 litros por día, y el incremento de habitantes según la gráfica No. 1.

La capacidad de la planta desaladora de Atlacani se iniciará con un volumen de 12,000 m<sup>3</sup> por día. Conforme la población vaya en aumento se puede ir incrementando la capacidad de la planta aumentando el número de módulos como se puede observar en la gráfica No. 2.



\* DEMANDA DE CONSUMO DE AGUA DE LA POBLACION DE LA CD. DE ATLACANI

Grafica No. 2

El planear el crecimiento de la planta por medio de módulos tiene varias ventajas; entre ellas podemos mencionar las siguientes:

La inversión se hace de acuerdo al crecimiento de la población.

El mantenimiento de un módulo se puede efectuar sin alterar la producción de los demás módulos y así se evita que la población padezca escasez de agua.

La capacidad de la planta tendrá que absorber los consumos domésticos, municipales e industriales.

Generalmente, las plantas de desalación suspenden sus operaciones en forma ocasional para las tareas de mantenimiento, reparación de fugas o por otros motivos. Por lo tanto, para proveer a la población de agua mientras la producción de la planta se detiene, es necesario contar con un almacenamiento de agua con capacidad para cubrir las necesidades más apremiantes.

#### III.4. Selección del proceso más viable.

Para la selección del proceso más adecuado para desalar agua de mar, deben de tenerse en cuenta la combinación de varios factores, tales como las características del agua de alimentación, confiabilidad, rapidez de respuesta, operabilidad y estabilidad. En este proyecto se desea, en particular, un comportamiento comprobado del proceso elegido, es decir, tener la seguridad de la experiencia y una buena disponibilidad.

En la actualidad, para el logro de los factores antes expuestos, la planta desaladora más apropiada es la de evaporación súbita en múltiples etapas; puesto que este proceso está basado en la destilación y se ha comprobado que estos diseños son los mejores para desalar aguas con alto contenido de salinidad, o sea agua del mar.

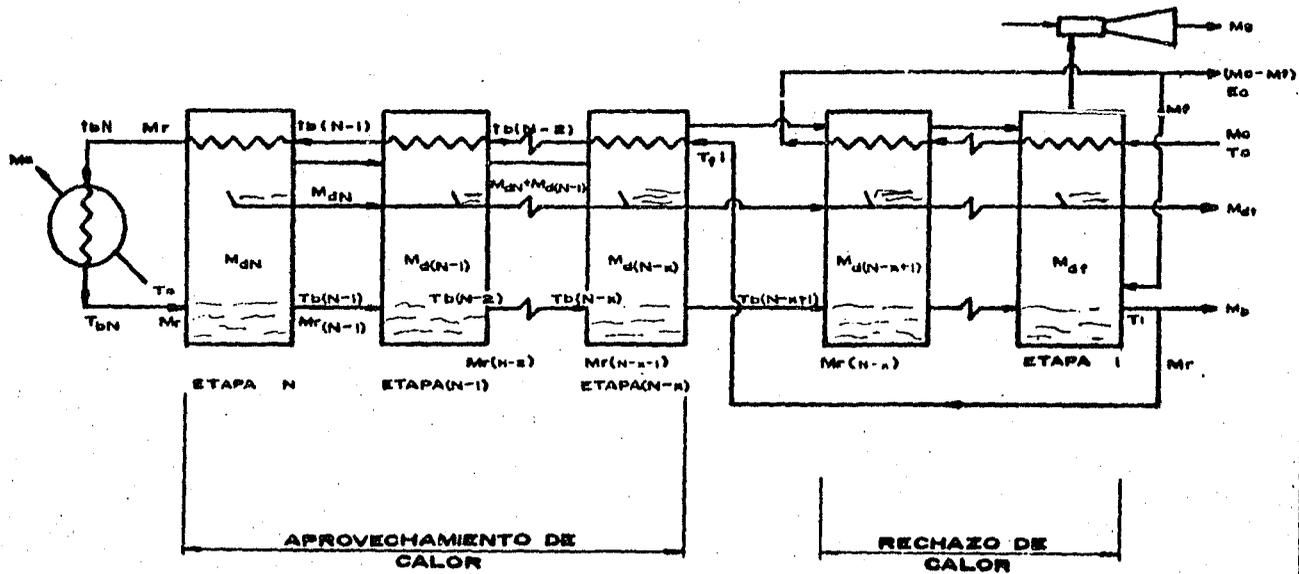
Además se ha comprobado que, para una producción mayor de  $3,000 \text{ m}^3$  por día, hay pocos procesos aceptados, uno de ellos es el de ESME, contando con proveedores reconocidos internacionalmente.

### III.5. Descripción del proceso evaporación súbita en múltiples etapas.

La evaporación súbita en múltiples etapas es un proceso que está constituido básicamente de cuatro flujos o corrientes, que son: flujo de aguas del mar, flujo de salmuera en recirculación, flujo de agua producto o destilado y flujo de vapor. (Ver fig.III,6.)

Es en el flujo de aguas del mar, donde el proceso se inicia cuando esas aguas marinas, crudas y frías, son bombeadas hasta la entrada de la sección de rechazo de calor. Conforme el agua va avanzando, se calienta a través del haz de tubos de condensación. Una vez que el agua sale de esta sección de rechazo de calor, parte del agua es regresada al mar y el resto es tratada químicamente -generalmente este tratamiento es con ácido sulfúrico-, pasando posteriormente al descarbonatador y deareador. En el descarbonatador se convierten los bicarbonatos a bióxido de carbono, el cuál

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA UNA PLANTA DE E.I.P.E.



**M<sub>o</sub>** - AGUA DE MAR PARA ENFRIAMIENTO.  
**M<sub>f</sub>** - AGUA DE MAR PARA ALIMENTACION.  
**M<sub>d</sub>** - DESTILADO PRODUCTO.  
**M<sub>b</sub>** - RECHAZO DE SALMUERA.  
**M<sub>r</sub>** - RECIRCULACION DE SALMUERA.  
**M<sub>g</sub>** - GASES NO CONDENSABLES.  
**M<sub>e</sub>** - MASA DE VAPOR SUMINISTRADO AL CALENTADOR.

Fig. III, 6

es expulsado a la atmósfera, y en el deareador se remueven tanto el oxígeno como otros gases que contienen las aguas del mar.

El segundo flujo es el de salmuera en recirculación el que se inicia cuando sale el agua del mar tratada por el deareador y mezclada con la salmuera concentrada, que se encuentra en la última etapa de rechazo de calor. Para mantener el balance de concentración necesario, la salmuera se remueve antes del mezclado y, una vez efectuado éste, se bombea la mezcla a la última etapa de recuperación de calor, que es la más fría.

La salmuera sale así de esta sección llegando a un calentador primario, donde recibe un incremento de calor hasta llegar a su temperatura límite de operación.

Al salir la salmuera de aquel calentamiento final, entra a la primera etapa del evaporador y la parte de la salmuera se evapora súbitamente, el vapor producido se condensa en la parte exterior de los tubos de condensación y, al mismo tiempo, cede calor a la salmuera que fluye por el interior de los tubos de la sección de recuperación de calor.

El condensado produce el destilado, en forma de gotas, que cae en charolas recolectoras.

La salmuera, después de evaporarse súbitamente, se enfría pasando a la siguiente etapa de presión menor. Así continúa sucesivamente en cada etapa, en las que cuenta con una presión más baja a la correspondiente temperatura de la salmuera entrante.

Finalmente, la salmuera concentrada sale de la última etapa, la más fría porque pertenece a la sección de rechazo del calor, donde parte de ella es retirada como purga y, la otra, regresa a recirculación.

Se tiene, en tercer lugar, el flujo de agua producto, o destilado, el que se hace cargo del destilado producido por la condensación del vapor. Este producto fluye a través de charolas recolectoras hasta llegar a la última etapa, de donde se bombea para su almacenamiento o distribución.

Se tiene por último el flujo de vapor, el que cuenta con dos divisiones: una de ellas es el vapor que llega al intercambiador del calentador primario, y la otra, la segunda, que resulta de la evaporación súbita en cada etapa. El condensado del intercambiador generalmente es regresado a la fuente externa (caldera), mientras que el condensado originado por la evaporación súbita se convierte en el destilado o producto.

## CAPITULO IV. DISEÑO DEL SISTEMA.

IV.1. Fundamentos de Transferencia de Calor.

IV.2. Antecedentes y descripción.

IV.3. Datos de diseño.

IV.4. Análisis y diseño del sistema para la planta.

a). Masa de alimentación al sistema.

b). Masa de recirculación.

c). Factor de recirculación.

d). Sección de adición de calor.

e). Factor de comportamiento.

f). Coeficiente total de transferencia de calor.

g). Sección de aprovechamiento de calor.

h). Sección de rechazo de calor.

#### IV. 1. Fundamentos de Transferencia de Calor.

La ciencia de la Termodinámica trata de las transiciones cuantitativas y reacomodos de energía como calor en los cuerpos de materia. La ciencia de la Transferencia de Calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor.

##### Mecanismos para la Transferencia de Calor.

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando unas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son: conducción, convección y radiación.

##### Conducción.

En este mecanismo el calor es transferido a través del material que constituye un cuerpo sólido por la acción de un gradiente de temperaturas sin que exista desplazamiento del material. Este mecanismo involucra la transferencia de energía cinética de una molécula a las adyacentes.

##### Convección.

Mecanismo en el que el calor es transferido por desplazamiento y mezcla de regiones calientes y frías de un gas o un líquido transportando el calor de una superficie sólida caliente en contacto con el fluido. El desplazamiento del fluido puede ser causado por la diferencia de densidades a diferentes temperaturas,

a lo que se denomina convección natural, o por la acción mecánica de una bomba, denominada convección forzada. En ambos casos interviene el mecanismo de convección a nivel molecular.

### Radiación.

En este mecanismo el calor es transferido por ondas electromagnéticas. La radiación térmica está gobernada por las mismas leyes que la luz, viaja en línea recta, obedece las leyes de reflexión y refracción y disminuye en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre emisor y receptor.

En los procesos de desalación la transferencia de calor ocurre casi exclusivamente por los dos primeros mecanismos citados.

#### IV.2. Antecedentes y descripción.

La planta desaladora de Atlacani es diseñada para suministrar el agua potable a la ciudad.

En esta planta se utiliza el proceso de evaporación súbita en múltiples etapas y consta de catorce etapas en la sección de aprovechamiento y dos etapas en la sección de rechazo de calor.

### IV.3. Datos de diseño.

$M_d$ = Capacidad de diseño.	500,000.0 Kg/hr.
$T_{bN}$ = Temperatura máxima de salmuera.	105°C
$T_I$ = Temperatura mínima de salmuera.	32.94°C
$P_v$ = Presión de vapor.	8.0 Kg/cm <sup>2</sup>
$F_c$ = Factor de comportamiento.	8
$T_s$ = Temperatura de vapor para aumentar el calentador de salmuera.	115°C
FC = Factor de concentración.	2
N = Número total de etapas.	16
v = Velocidad de la salmuera.	1.83 m/seg.
$\emptyset$ = Diámetro de los tubos.	1.6 cm.
U = Coeficiente total de Transferencia de calor.	2,441.5 KCal/hr m <sup>2</sup> °C
Temperatura del agua de mar para enfriamiento.	24.0°C

IV.4 Análisis y diseño del sistema para la planta.

a). Masa de alimentación al sistema. ( $M_f$ )

Haciendo un balance de masa en el sistema, se tiene:

$\Sigma M$  entrada =  $\Sigma M$  salida. (Ver fig. III, 6.)

$$M_c + M_s = (M_c - M_f) + M_d + M_b + M_s$$

despejando  $M_f$ , se obtiene :

$$M_f = M_d + M_b \dots \dots \dots \text{Ec. 1.}$$

y por un balance de sales, se tiene:

$$x_f M_f = x_d M_d + x_b M_b$$

donde "x" es la concentración de sales en cada una de las corrientes respectivas:

Como  $x_d = 0$  ppm; (concentración de destilado)

se tiene que:

$$\frac{x_b}{x_f} = \frac{M_f}{M_b} \dots \dots \dots \text{Ec. 2.}$$

La relación anterior se define como factor de concentración que es la relación de la salinidad de la salmuera concentrada de rechazo y la salinidad del agua que alimenta a la planta.

De acuerdo a la Ec. 2; y el valor del factor de concentración, se observa, la siguiente igualdad:

$$\frac{M_f}{M_b} = \frac{x_b}{x_f} = 2$$

De las anteriores ecuaciones, se tiene el siguiente sistema:

$$M_f = M_d + M_b$$

y;

$$\frac{M_f}{M_b} = 2$$

Despejando  $M_f$  de la anterior ecuación, se tiene que:

$$M_f = 2 M_b \dots \dots \dots \text{Ec. 3.}$$

Sustituyendo en ec. 1, se obtiene:

$$2 M_b = M_d + M_b ;$$

Despejando,

$$M_b = M_d$$

Por lo tanto:

$$M_b = 500,000 \text{ Kg/Hr.}$$

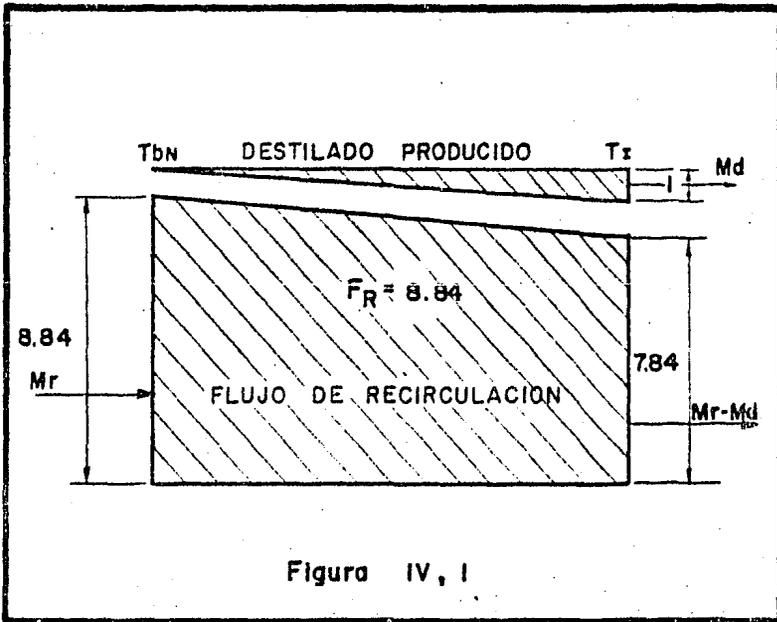
Asimismo, sustituyendo  $M_b$ , en la ec. 3; se tiene:

$$M_f = 2 M_b = 2 \times 500,000 = 1'000,000 \text{ Kg/hr.}$$

b). Masa de recirculación. ( $M_r$ )

Existen dos flujos principales a lo largo de toda la planta. Lo anterior se puede observar en la fig. IV.1.

- 1). El flujo de destilado ( $M_d$ ), que va en aumento a medida que se recorre la planta, desde la etapa más caliente a la más fría.
- 2). El flujo de recirculación ( $M_r$ ), que disminuye en la dirección anterior.



Haciendo un balance promedio de calor, se tiene

$$M_d \bar{L} = \bar{M}_r \bar{C}_p (T_{bN} - T_I) \dots \dots \dots \text{Ec. 4}$$

donde:

$M_d$  = Masa total de destilado producido.

y:

$$\bar{M}_r = \frac{M_r + (M_r - M_d)}{2} \dots \dots \dots \text{Ec. 5}$$

Por lo tanto, sustituyendo la ec. 5 en la ec. 4, se tiene:

$$M_d \bar{L} = (M_r - \frac{M_d}{2}) \bar{C}_p (T_{bN} - T_I)$$

Despejando  $M_r$  de la ecuación anterior:

$$M_r = M_d \left[ \frac{\bar{L}}{\bar{C}_p (T_{bN} - T_I)} + 1/2 \right] \dots \dots \text{Ec. 6}$$

donde:

$M_d$  = Masa de destilado. ( kg./hr. )

$\bar{L}$  = Calor latente. ( KCal/Kg )

$\bar{C}_p$  = Calor específico. ( KCal/Kg<sup>o</sup>C )

$T_{bN}$  = Temperatura máxima de la salmuera. (°C)

$T_I$  = Temperatura mínima de la salmuera. (°C)

c). Factor de recirculación. ( $F_r$ ).

El factor de recirculación se define como el número de kilos de agua de recirculación necesarias para obtener un kilo de agua producto, de tal manera que:

$$F_r = \frac{M_r}{M_d} \dots \dots \dots \text{Ec. 7}$$

De acuerdo a las ecuaciones 6 y 7, se tiene que:

$$F_r = \frac{L}{C_p (T_{bN} - T_I)} + 1/2 \dots \dots \dots \text{Ec. 8}$$

Considerando el promedio de temperaturas que es de  $68.97^\circ\text{C}$ ; las principales propiedades de la salmuera en la planta son:

$$C_p = 0.9289878 \text{ KCal/Kg}^\circ\text{C.}$$

$$L = 558.073 \text{ KCal/Kg.}$$

Por lo tanto, sustituyendo los valores anteriores en la ec. 6, se tiene que:

$$M_r = 500,000 \left[ \frac{558.073}{0.9289878 (105-32.94)} + 1/2 \right]$$

$$M_r = 4'418.293.6 \text{ Kg/hr.}$$

que es el flujo de recirculado necesario para obtener el flujo de destilado requerido.

Asimismo, al sustituir valores en la ec. 8, obtenemos el factor de recirculación.

$$F_r = \frac{558.073}{0.9289878 (105 - 32.94)} + 1/2 = 8.84$$

d). Sección de adición de calor.

El calor transferido por el calentador a la salmuera; así como, su temperatura a la entrada y el cálculo del mismo, se harán a partir de la siguiente figura IV,2.

e). Factor de comportamiento.

El factor de comportamiento es la cantidad de producto obtenido por cada 1,000 KCal suministradas al calentador de salmuera o por cantidad de vapor suministrada al mismo calentador.

Así pues,

$$F_c = \frac{M_d}{M_s} \dots \dots \dots \text{Ec. 9}$$

Por otra parte, si

$$M_s = \frac{Q_H}{L_s} ;$$

Entonces, sustituyendo en la anterior, se tiene que también

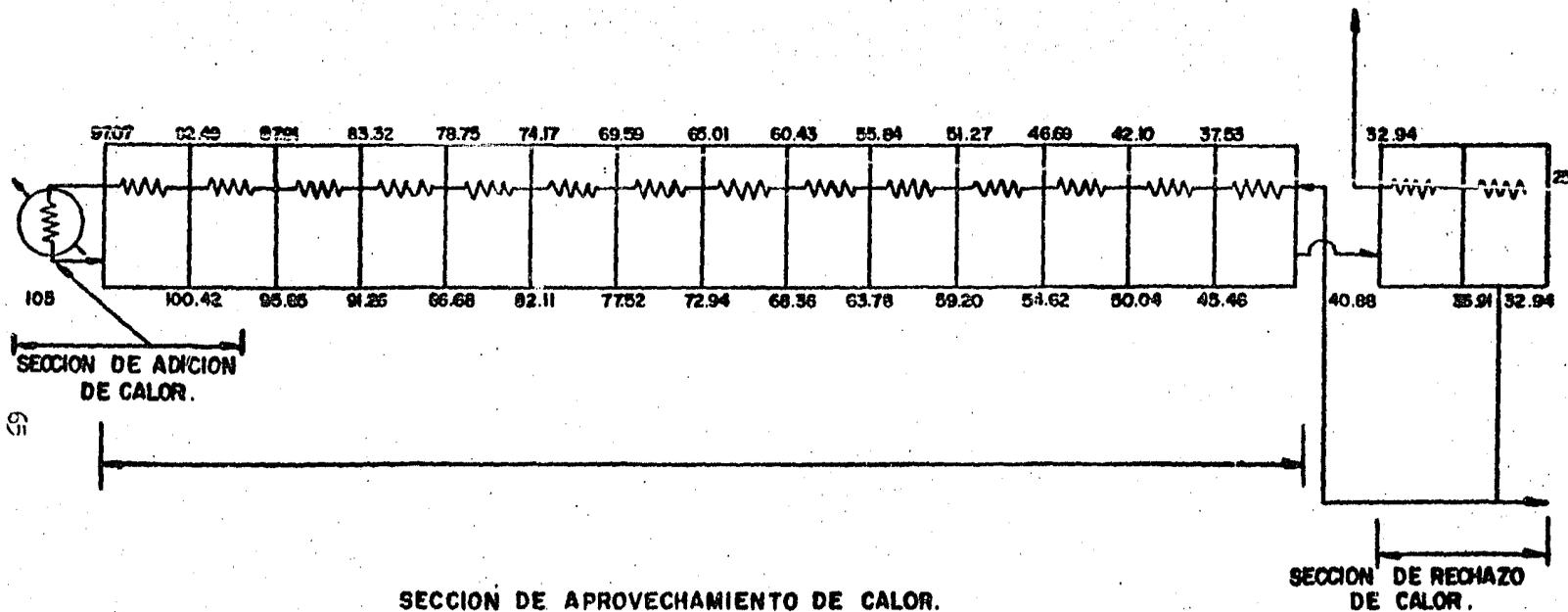


DIAGRAMA DE FLUJO

Figura IV, 2

$$F_c = \frac{M_d}{\frac{Q_H}{L_s}} \dots \dots \dots \text{Ec. 10}$$

donde:

$M_s$  = Masa de vapor suministrado al calentador.

$Q_H$  = Energía calorífica suministrada al calentador.

$L_s$  = Entalpia de vaporización en el calentador obtenida del Chemical engineer's handbook.

De la ec. 10, se tiene que el calor suministrado al sistema es :

$$Q_H = \frac{M_d L_s}{F_c}$$

donde sustituyendo, se tiene que:

$$Q_H = \frac{500,000 \times 525.87}{8} =$$

$$Q_H = 3.29 \times 10^7 \text{ K Cal/hr.}$$

Por otra parte, por un balance de energía en el calentador, se tiene que el calor transferido a la salmuera es:

$$Q_H = M_r C_p (T_{bN} - t_{bN}) \dots \dots \dots \text{Ec. 11}$$

sustituyendo la ecuación anterior en la ec. 10; se obtiene que:

$$F_c = \frac{M_d L_s}{M_r C_p (T_{bN} - t_{bN})} \dots \dots \dots \text{Ec. 12}$$

Por lo tanto, la diferencia de temperaturas en el calentador de acuerdo a la ecuación anterior, queda expresada de la siguiente manera:

$$\Delta T_H = (T_{bN} - t_{bN}) = \frac{M_d L_s}{M_r C_p F_c} \dots \dots \dots \text{Ec. 13}$$

donde:

$t_{bN}$  = Temperatura de entrada al calentador.

De la ec. 13, se puede tener la siguiente expresión:

$$t_{bN} = T_{bN} - T_H \dots \dots \dots \text{Ec. 14}$$

sustituyendo valores en la ec. 13, se tiene:

$$\Delta T_H = \frac{500,000 \times 525.87}{4,418,293.6 \times 0.9383298 \times 8} = 7.93^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_H = 7.93^\circ\text{C}.$$

Ahora, sustituyendo  $T_H$  en la ec. 14, se obtiene la temperatura de entrada al calentador que es:

$$t_{bN} = 105 - 7.93 = 97.07^\circ\text{C}$$

f). Coeficiente total de transferencia de calor.

La rapidez de transferencia de calor en un intercambiador, puede ser expresada como:

$$Q_c = U A \Delta T_{\log} \dots \dots \dots \text{Ec. 15}$$

donde:

$Q$  = Rapidez de transferencia de calor.

$A$  = Area de transferencia de calor.

$U$  = Coeficiente total de transferencia de calor.

$\Delta T_{\log}$  = Media logarítmica de diferencia de temperaturas.

En función de la fig. IV, 3, el coeficiente total de transferencia de calor, puede ser calculado de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_s} + fc \dots \dots \dots \text{Ec. 16}$$

de la anterior y de acuerdo a las propiedades promedio de todo el sistema y los materiales usados en la tubería, se tiene que:

$$U_H = 2,441.5 \text{ Kcal/hr m}^2 \text{ }^\circ\text{C.}$$

g). Area de transferencia de calor.

El área requerida para lograr el calentamiento de la salmuera a la temperatura  $T_{bN}$  en la sección del calentador será:

$$A_H = \frac{Q_H}{U_H \Delta T_{\log}} \dots \dots \dots \text{Ec. 17}$$

En la fig. IV,4 se observa que el calor transferido a la salmuera es:

$$Q_H = M_r C_p (T_{bN} - t_{bN})$$

y la diferencia media logarítmica de temperatura es:

## PERDIDAS EN TRANSFERENCIA DE CALOR

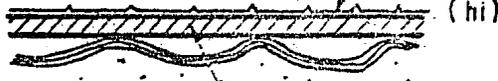
Coefficiente de condensación ( $h_e$ )



$Mr$  ← Salmuera ( $h_s$ )

Factor de ensuciamiento ( $f_c$ )

Coefficiente interno



Vapor

Pared del tubo ( $h_t$ )

Figura IV, 3

# CALENTADOR DE SALMUERA

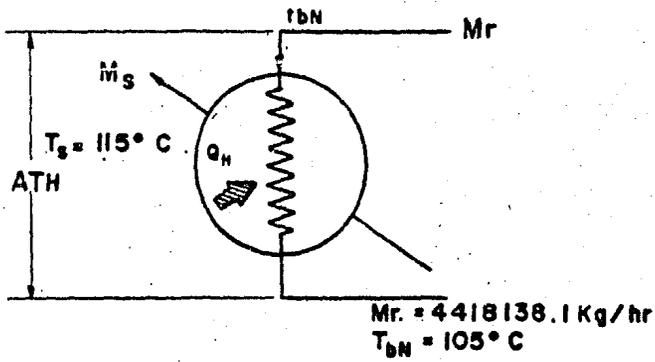


Figura IV-4

$$\Delta T_{\log H} = \frac{T_{bN} - t_{bN}}{\ln \frac{T_s - t_{bN}}{T_s - T_{bN}}} \dots \dots \dots \text{Ec. 18}$$

donde:

$T_s$  = Temperatura de vapor suministrado al calentador.

sustituyendo valores en la ec. 18, se tiene que:

$$\Delta T_{\log H} = \frac{105 - 97.07}{\ln \frac{115 - 97.07}{115 - 105}}$$

$$\Delta T_{\log H} = 13.59 \text{ } ^\circ\text{C.}$$

Asimismo, sustituyendo los valores anteriores en la ec.17, se tiene que:

$$A_H = \frac{3.29 \times 10^7}{2,441.5 \times 13.59} = 991.6 \text{ m}^2.$$

Ahora, solo queda por determinar el número de pasos, de tubos y su longitud para el calentador.

La construcción del calentador y los condensadores del sistema será con tubería Cupro-Níquel (90-10) y de los siguientes diámetros:

$$D_{\text{int.}} = 1.41 \text{ cm.}$$

$$D_{\text{ext.}} = 1.59 \text{ cm.}$$

Por lo tanto, el área transversal de un tubo es :

$$A_T = \frac{\pi D_{int}^2}{4} = 1.56 \text{ cm}^2$$

Por otra parte, el área perimetral de todos los tubos es igual al área de transferencia de calor y como se conocen los diámetros interior y exterior de los tubos, se tiene la siguiente ecuación.

$$A_p = A_H = \pi D_{ext.} L_{TH} \dots \dots \dots \text{Ec. 19}$$

despejando  $L_{TH}$ , se tiene

$$L_{TH} = \frac{A_H}{\pi D_{ext.}}$$

donde:

$A_p$  = Área perimetral de todos los tubos.

$L_{TH}$  = Longitud total de tubos.

sustituyendo valores en la ec. 20; se obtiene:

$$L_{TH} = \frac{991.6}{\pi \times 0.0159} =$$

$$L_{TH} = 19,851 \text{ m.}$$

Para evitar incrustaciones y erosiones en el calentador, la velocidad de la salmuera será de 1.83 m/seg. Por lo tanto, se puede calcular el área del flujo en esta sección, sabiendo que:

$$M_r = \rho_{bH} V_{bH} A_{FH} \dots \dots \dots \text{Ec. 21}$$

despejando:

$$A_{FH} = \frac{M_r}{\rho_{bH} V_{bH}} \dots \dots \dots \text{Ec. 22}$$

en donde:

$A_{fH}$  = área de flujo.

$\rho_{bH}$  = Densidad de la salmuera a la temperatura promedio.

sustituyendo valores, se tiene que:

$$A_{fH} = \frac{4'418,293.6}{1,006.04 \times 1.83 \times 3,600} = 0.666 \text{ m}^2$$

$$A_{fH} = 0.666 \text{ m}^2$$

De las relaciones anteriores, se observa que:

$$N_{TH} = \frac{A_{fH}}{A_T} \dots \dots \dots \text{Ec. 23}$$

donde:

$N_{TH}$  = Número de tubos en el calentador.

sustituyendo valores, en la ec. 23, se obtiene:

$$N_{TH} = \frac{0.666}{0.000156} = 4,269 \text{ tubos.}$$

Por lo tanto, la longitud por tubo y por paso del calentador será:

$$L_H = \frac{L_{TH}}{N_{TH} P_H} \dots \dots \dots \text{Ec. 24}$$

donde:

$P_H$  = número de pasos del calentador.

habiendo dos pasos en el calentador, la longitud de cada tubo por paso será de la ec. 24:

$$L_H = \frac{19,851}{4,269} \text{ m/tubo} \times \text{paso.} = 2.33 \text{ m.}$$

h). Sección de aprovechamiento de calor.

El flujo de recirculación que pasa por dentro de los tubos de los condensadores, sufre un incremento de temperatura en cada una de sus etapas. (Ver fig. IV,5.)

Asimismo, las propiedades principales del flujo de recirculación en esta sección se tomarán con el promedio de sus temperaturas de entrada y salida:

$$T = \frac{105 + 40.88}{2} = 72.94^{\circ}\text{C}$$

de donde:

$$\rho_b = 1,024.35 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 0.9300701 \text{ Kcal/Kg } ^{\circ}\text{C}$$

$$L = 555,693 \text{ Kcal/Kg.}$$

Además, se tiene que el flujo de recirculación es :

$$M_{rA} = 4'418,293.6 \text{ Kg/hr.}$$

y el flujo del destilado:

$$M_d = 500,000 \text{ Kg/hr.}$$

asimismo, el calor transferido en cada etapa de esta sección es:

$$Q = 3.29 \times 10^7 \text{ Kcal/hr.}$$

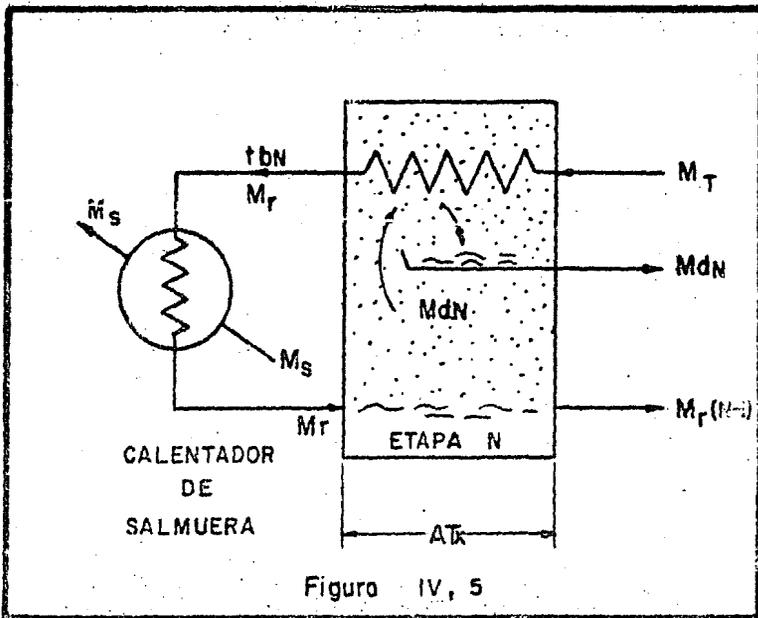


Figura IV, 5

por lo tanto, el total de ésta será:

$$Q_A = 3.29 \times 10^7 \times 14 = 4.61 \times 10^8$$

Por otra parte, se tiene que:

$$Q_A = U A_A \Delta T_{\log A} \dots \dots \dots \text{Ec. 25}$$

y la diferencia media logarítmica de temperatura:

$$\Delta T_{\log A} = \frac{(T_v - T_2) - (T_v - T_1)}{\ln \frac{T_v - T_2}{T_v - T_1}} \dots \dots \dots \text{Ec. 26}$$

donde:

$T_v$  = Temperatura de la salmuera al evaporarse.

$T_1$  = Temperatura inicial de la salmuera en el tubo.

$T_2$  = Temperatura final de la salmuera en el tubo.

Por otra parte, se sabe que la salmuera al evaporarse pierde calor; siendo esta pérdida:

$$\bar{e} = 1.67^\circ\text{C}.$$

por lo cual el valor,

$$T_v = \bar{T} - \bar{e}$$

$$T_v = 72.94 - 1.67 = 71.27^\circ\text{C}.$$

ahora bien, sustituyendo valores en la ec. 26,

$$\Delta T_{\log A} = \frac{(71.27 - 60.43) - (71.27 - 65.01)}{\ln \frac{71.27 - 60.43}{71.27 - 65.01}}$$

$$\Delta T_{\log A} = 8.36^\circ\text{C}.$$

con los valores anteriores y despejando  $A_A$  de la ec. 25, se tiene:

$$A_A = \frac{Q_A}{U_A \Delta T_{\log A}}$$

sustituyendo tenemos:

$$A_A = \frac{4.61 \times 10^8}{2,441.5 \times 8.36}$$

$$A_A = 2.2586 \times 10^4 \text{ m}^2 .$$

Anteriormente, se tiene que el área transversal de un tubo es:

$$A_T = 1.56 \text{ cm}^2$$

y de las ecuaciones 19 y 20,

$$L_{TA} = \frac{2.2586 \times 10^4}{\pi \times 0.0159}$$

$$L_{TA} = 452,160 \text{ m}.$$

En esta sección, la velocidad de la salmuera es de 1.83 m/seg y el área de flujo de acuerdo con la ec. 22, es:

$$A_{fA} = \frac{M_r}{\rho_{bA} v_{bA}}$$

sustituyendo:

$$A_{fA} = \frac{4'418,293.6}{1,028.68 \times 1.83 \times 3,600} =$$

$$A_{fA} = 0.652 \text{ m}^2$$

de lo anterior y sustituyendo en la ec. 23, el número de tubos en esta sección es:

$$N_{TA} = \frac{0.652}{0.000156} = 4,179 \text{ tubos.}$$

sustituyendo el valor anterior en la ec. 24, obtenemos para esta sección la longitud por tubo y por etapa:

$$L_A = \frac{452,160}{4,179 \times 14 \times 4}$$

siendo esta sección de catorce etapas y teniendo los condensadores cuatro pasos en cada etapa, la longitud de cada tubo por etapa y por paso será de:

$$L_A = 1.93 \text{ m/paso} \times \text{tubo} \times \text{etapa.}$$

1). Sección de rechazo de calor.

Para el diseño de la sección de rechazo de calor se pueden tener dos alternativas:

- 1). Areas de transferencia de calor distintas en cada etapa de esta sección, que aseguren una caída de temperatura igual en cada una de estas etapas.
- 2). Areas de transferencia de calor iguales en cada etapa de esta sección, aunque estas no aseguren una caída de temperatura igual en cada etapa.

Desde el punto de vista de manufactura, la alternativa 2 es la más razonable y es la que se considerará para el estudio y análisis de esta sección.

Haciendo un balance de calor, se observa en la fig.IV,2 que:

$$\sum Q_{\text{entran}} = \sum Q_{\text{salen}}$$

El flujo de recirculación para esta sección es el conocido anteriormente que es:

$$M_r = 41418,138.1 \text{ Kg/hr.}$$

El promedio de las temperaturas de entrada y salida en la sección es:

$$T = \frac{40.88 + 32.94}{2} = 36.91^\circ\text{C}$$

y sus características son:

$$\rho_b = 1,041.74 \text{ Kg/m}^3$$

$$C_p = 0.921008 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$$

$$L = 576.899 \text{ Kcal/Kg.}$$

Para el diseño en esta sección, el calor suministrado es:

$Q = 3.29 \times 10^7 \text{ Kcal/hr}$  ; por etapa y el total será en esta sección de:

$$Q_R = 3.29 \times 10^7 \times 2 = 6.58 \times 10^7 \text{ Kcal/hr.}$$

Por otra parte, la pérdida de calor que sufre la sal - muera al evaporarse, se considera en esta sección de:

$$\bar{e} = 2.22^\circ\text{C}$$

por lo tanto el valor de  $T_v$  se considera

$$T_v = T - \bar{e}$$

$$T_v = 36.91 - 2.22 = 34.69^\circ\text{C}$$

por lo que sustituyendo valores en la ec. 26, se obtiene que la diferencia media logarítmica de temperaturas es:

$$\Delta T_{\log R} = \frac{(34.69 - 25.0) - (34.69 - 32.94)}{\ln \frac{34.69 - 25.0}{34.69 - 32.94}} = 4.64^{\circ}\text{C}$$

Con lo anterior y despejando  $A_R$  de la ec. 25, se tiene que:

$$A_R = \frac{Q_R}{U_R \Delta T_{\log R}}$$

sustituyendo valores:

$$A_R = \frac{6.58 \times 10^7}{2,441.5 \times 4.64} =$$

$$A_R = 5,808.32 \text{ m}^2$$

Asimismo, se conoce el área transversal de un tubo que es:

$$A_T = 1.56 \text{ cm}^2$$

y de las ecs. 19 y 20, se obtiene la longitud de los tubos.

$$L_{TR} = \frac{5,808.32}{\pi \times 0.0159} =$$

$$L_{TR} = 116,279.3 \text{ m.}$$

Considerando que la velocidad de la salmuera en esta sección se fija como 1.83 m/seg., se puede saber que el área del flujo es:

$$A_{fR} = \frac{4'418.293.6}{1,041.74 \times 1.83 \times 3,600} =$$

$$A_{fR} = 0.6438 \text{ m}^2$$

De lo anterior, el número de tubos en la sección de rechazo de calor es:

$$N_{TR} = \frac{0.6438}{.000156} = 4,127 \text{ tubos}$$

Para simplificar la construcción de la planta, se considera que la longitud de los tubos de todos los condensadores por etapa y por paso fuera la misma, por lo tanto:

$$L_R = \frac{116,279.3}{4,127 \times 2 \times 6}$$

$$L_R = 2.35 \text{ m/paso} \times \text{etapa} \times \text{tubo.}$$

**CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

México es un país de extenso territorio, con cerca de dos millones de km<sup>2</sup>, de los cuales un 67% es desértico, árido y semiárido; además, su situación geográfica y su geología han dado origen a sus increíbles contrastes naturales; exhuberantes selvas, extensos desiertos y elevadas montañas de clima alpino.

De lo anterior, se deduce el desequilibrio hidráulico que padece el país y que refleja asentamientos humanos que no corresponden a la disponibilidad del agua con la que cuenta.

Por otra parte, coincide que estas zonas áridas se localicen en su mayoría en las costas con su consecuente escasez de aguas subterráneas y superficiales; lo que ha originado que el 80% de de salación utilizada en México exista en estas regiones que cuentan en sus litorales con agua de mar, fuente inagotable para la producción de agua dulce.

La utilización de los diferentes métodos de desalación que existen actualmente, depende de la concentración de sales y del gasto de agua a producir. Los costos de desalación varían con el método utilizado y guardan una relación de proporcionalidad inversa al tamaño de la planta.

Así pues, si la capacidad de producción necesaria es mayor a 800 metros cúbicos por día, existen tres procesos basados en la evaporación que tienen respaldo significativo: Evaporación súbita en múltiples etapas, en tubos verticales y en tubos horizonta

les.

De los anteriores, el que tiene una disponibilidad inmediata con más de diez fabricantes de prestigio internacional es el ESME ya que su comportamiento está comprobado por la alta experiencia con que cuenta; además, otra consideración importante para su elección, es que el agua de alimentación al ser más fría beneficia la economía térmica del proceso.

Otra medida significativa es el fijar el factor de economía o comportamiento adecuado ya que éste limita la eficiencia global del sistema. En consecuencia, si la planta es de baja eficiencia se requiere de mayores inversiones en la toma y rechazo de agua de mar y salmuera. Naturalmente, consumen más combustible que una planta con mayor eficiencia.

Otro reflejo de su buena selección es que minimiza el costo del agua.

Así también, el optar por integrar la planta con unidades idénticas a capacidad de acuerdo al aumento progresivo de la población proporciona mayor flexibilidad de operación y mantenimiento.

Actualmente, la experiencia con que cuenta el campo de la desalación a nivel internacional, ha respondido no solamente a requerimientos para consumo doméstico o municipal, sino al abastecimiento industrial; como ha sucedido en países que a pesar de carecer de recursos naturales han logrado a base de este sistema resolver sus problemas de agua.

Un ejemplo de lo anterior, es la desaladora de Hong Kong, hoy en día la planta más grande del mundo en operación, con capacidad de  $2.0 \text{ m}^3/\text{seg.}$ ; además de las diseminadas por otros países que se apoyan en el proceso del tipo ESME.

En México, se cuenta con experiencia suficiente para operar plantas de este tipo en base a las consideraciones de experiencia, costos iniciales, problemas de extrapolación en los diseños, operación, control de incrustaciones, coeficiente de transferencia de calor, número de etapas, costos de instalación, costos de operación y costos totales de agua producto.

Tanto la Dirección General para el Aprovechamiento de Aguas Salinas ( D.I.G.A.A.S. ) como la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E. ) controlan la operación y mantenimiento de las mismas. Asimismo, fomentan la investigación para lograr un avance tecnológico y poder saltar la limitante surgida por el costo de energía que en la actualidad ha llegado hasta representar un 40% del costo total. Sin embargo, surge la esperanza de abaratar los costos al observar el desarrollo sobre el diseño de la Osmosis Inversa ya que reduce considerablemente la demanda energética.

## B I B L I O G R A F I A

1. Curso teórico práctico sobre desalación.  
Dirección General para el Aprovechamiento de Aguas Salinas.  
1980. S.A.H.O.P.
2. Ingeniería Sanitaria.  
Ing. Ernesto Murguía Vaca.  
Facultad de Ingeniería, U.N.A.M.
3. Bases para el aprovechamiento racional de los recursos hidráulicos en México.  
Ing. Oscar Benassini.  
Ingeniería Hidráulica en México, 1971.
4. Manual de introducción a la desalación  
Ing. Eduardo Latapí Fox.  
México, 1977.
5. Procesos y Transferencia de Calor.  
Donald Q. Kern.  
México, 1978.
6. Technical data book.  
Office of Saline Water. O.S.W.
7. Principles of Desalination.  
Spiegler K. S.  
New York, 1966.

8. Principios básicos para el diseño termodinámico de una planta desaladora de evaporación instantánea por etapas.  
David Paul Antonoff Aglot y Rafael Gerardo López Meneses.  
México, D.F. 1979.
9. Programa Propiedades del Agua Salina.  
Dirección General para el Aprovechamiento de Aguas Salinas.  
S.A.H.O.P.  
Ing. Francisco M. Navarro Cota.
10. Estudios previos, ingeniería y desarrollo de procesos de desalación.  
Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas.  
S.A.H.O.P. 1977.
11. Estudios socioeconómicos para determinar la conveniencia de instalar un sistema de desalación.  
Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas.  
S.A.H.O.P. 1977.
12. Cartas topográficas.  
Dirección de Estudios del Territorio Nacional.  
México, 1980.