

130
99.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

DESTILACION SOLAR. UNA ALTERNATIVA PARA
OBTENER AGUA DULCE A PARTIR DE
AGUA DE MAR

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :
CARLOS EDGAR RIVAS MENDOZA



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1990



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.

DESTILACION SOLAR

UNA ALTERNATIVA PARA OBTENER AGUA DULCE A PARTIR DE AGUA DE MAR.

TEMA 1	INTRODUCCION	1
TEMA 2	DESALACION Y ENERGIA SOLAR	5
	2.1. Breve historia de la desalación.	5
	2.2. Antecedentes de la desalación en México.	8
	2.3. Problemática actual del país en materia de desalación.	10
	2.4. Breve historia de las aplicaciones de la energía solar.	21
	2.5. Principales aspectos teóricos relativos con la energía solar.	23
	2.6. Factores que determinan la irradiación solar en México.	29
	2.7. Algunos registros de insolación en México.	34
TEMA 3	OBRAS DE TOMA	47
	3.1. Generalidades.	47
	3.2. Métodos de toma directa.	49
	3.2.1. Canal de captación.	51
	3.2.2. Línea submarina anclada.	53
	3.2.3. Toma de agua con protección de flora y fauna.	55
	3.2.4. Tomas con eliminación de arena.	55
	3.3. Métodos de toma indirecta.	56
	3.3.1. Toma de pozo profundo.	56
	3.3.2. Captación por pozo marino.	59
	3.3.3. Toma de agua utilizando instalacio- nes marinas.	60

TEMA 4

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESALACIÓN.		
	DESALACIÓN.	82
4.1.	Generalidades.	82
4.2.	Tecnologías de membrana.	85
4.2.1.	Osmosis inversa.	85
4.2.2.	Electrodialísis y electrodialísis inversa.	89
4.2.3.	Consideraciones del sistema.	72
4.2.3.1.	Pretratamiento.	
4.2.3.2.	Sistema de bombeo.	
4.2.3.3.	Unidad de desalación.	
4.2.3.4.	Postratamiento.	
4.2.4.	Calidad del agua de alimentación.	75
4.2.4.1.	Sólidos disueltos.	
4.2.4.2.	pH.	
4.2.4.3.	Temperatura.	
4.2.4.4.	Sales poco solubles.	
4.2.4.5.	Sólidos suspendidos.	
4.2.4.6.	Hierro y magnesio.	
4.2.4.7.	Crecimiento microbiano.	
4.2.4.8.	Orgánicos.	
4.2.5.	Utilización final del agua producto.	79
4.2.6.	Disposición del desecho concentrado.	80
4.2.7.	Fuentes potenciales de agua.	80
4.2.8.	Aplicaciones de la tecnología de membrana.	80
4.3.	Intercambio iónico por resina.	81
4.3.1.	Principios y métodos de desalación con intercambio iónico por resina.	82
4.3.2.	Método de regeneración de resina.	83
4.3.3.	Pretratamiento.	83
4.3.4.	Conclusiones acerca de la desmineralización con intercambio iónico.	84
4.4.	Destilación solar.	84
4.4.1.	Partes de que se forma el destilador solar.	85
4.4.2.	Diferentes tipos de destiladores solares.	85

TEMA 5	DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESTILACION SOLAR	91
5.1.	Generalidades.	91
5.2.	Modelos matemáticos para diseñar destiladores solares.	96
5.3.	Consideraciones económicas.	103
5.4.	Selección del diseño óptimo.	108
5.5.	Características generales de la planta piloto.	110
5.6.	Instalación en el campo.	116
5.7.	Características de la instalación final.	118
5.8.	Justificaciones técnicas del proceso.	119
5.9.	Producción del condensado.	126
5.10.	Inclinación y orientación de los colectores solares.	127
5.11.	Correlación de los resultados experimentales con la teoría.	127
TEMA 6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
6.1.	Conclusiones.	131
6.1.1.	Acerca de las obras de toma.	134
6.1.2.	Acerca de los sistemas de desalación.	135
6.1.3.	Acerca del diseño de una planta de destilación.	138
6.2.	Recomendaciones.	142
	BIBLIOGRAFIA	145

1 INTRODUCCION

Desde el punto de vista general y comparativo, el agua sólo representa el 0.00023 % con respecto a la masa total que constituye la tierra, sin embargo, la cifra anotada es en apariencia insignificante, pero de trascendental importancia para la existencia de la vida sobre nuestro planeta.

Con respecto a la superficie total de la tierra, el agua cubre un 72 % de su extensión, no olvidando que el agua se encuentra en la naturaleza en tres estados físicos, líquido, sólido y gaseoso, cuyas respectivas masas son muy desiguales.

También podemos enfocar la existencia del agua desde otro ángulo que nos permite advertir las siguientes diferencias y cuyo reparto es también heterogéneo (figura 1.1).

- El agua atmosférica capaz de precipitarse.
- El agua terrestre: superficial y subterránea, y

- El agua de los océanos.

Esta última representa aproximadamente el 97.5 % del volumen total del agua existente. El problema se agrava si consideramos que, del 2.5 % restante los hielos de las montañas y los casquetes polares constituyen el 0.98 % y el 1.52 % restante es en realidad la cantidad de agua disponible en forma de ríos y lagos, capaz de disponerse de ella en forma prácticamente inmediata.

Dichas aguas, a su vez, se clasifican en aguas dulces y saladas. Las primeras son aptas para el consumo humano e idóneas para la industria, la ganadería y la agricultura; las segundas poseen un alto contenido en sólidos disueltos (más de mil partes por millón), que impiden su disponibilidad tanto para el consumo del hombre como para otros usos agropecuarios e industriales.

Estas cifras son en gran medida alertadoras, ya que de continuar el mismo ritmo de desarrollo demográfico y económico, en el año 2070, las necesidades corresponderán exactamente a la totalidad del agua teóricamente movilizable.

Por tal motivo y para el mejor aprovechamiento de los recursos, en los últimos años se ha propiciado la búsqueda de nuevas fórmulas, particularmente la desalación, e incluso el remolque de voluminosos icebergs, para proveer de agua a los países más necesitados.

Frente a estas circunstancias tan desfavorables, se ha pensado, y con razón, que el futuro del mundo estará dado en función a los adelantos técnicos en materia de desalación y otros métodos para mejorar el rehuso del agua y de los cuales nuestro país no puede permanecer al margen (Figura 1.1).

El presente trabajo se propone analizar un proceso para proporcionar agua potable a bajo costo a pequeñas comunidades, aprovechando para ello la energía proveniente del sol mediante un sencillo y económico destilador solar de agua marina, capaz de abastecer agua en cantidades del orden de 500 a 1,000 litros diarios, técnica poco empleada en México para potabilización.

El destilador se recomienda para zonas del país donde la carencia de agua potable es aguda. La razón de elegir la destilación solar obedece en muy buena parte a la sencillez de construcción con materiales y equipo totalmente locales, lo que hace además, que los

costos de operación y mantenimiento se abatan fuertemente, razón por la cuál la combinación de los parámetros constructivos deben ser tales que resulte de costo mínimo a largo plazo.

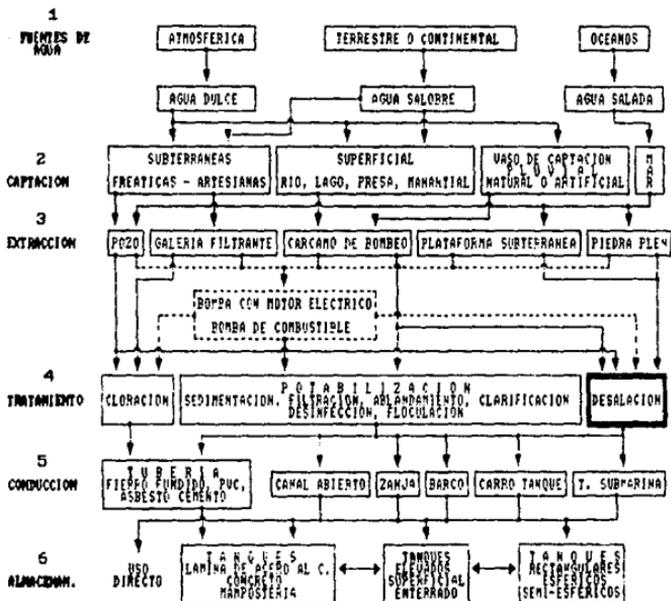
Todo esto nos hace reflexionar y enfocándolo al objetivo particular del trabajo, afirmo que el agua de mar es un recurso abundante que aparece como una alternativa de suministro, además el conocimiento del gran valor que tiene el agua, ha sido tomado en cuenta por todo el mundo, y los problemas relativos son siempre considerados como un tema importante en el escenario internacional.

Por tal motivo, al referirse a la desalación del agua, no se busca comentar una innovación técnica sino, más bien, adaptar la tecnología existente a las necesidades y al mismo tiempo lograr la autosuficiencia en su fabricación.

En el presente trabajo comenzaremos haciendo referencia de temas tales como una breve historia de la desalación en la cuál se comentará de algunos de los personajes de la época antigua que, de alguna manera, contribuyeron para aumentar el conocimiento actual respecto al tema. Proseguiremos con un comentario relativo a las zonas con mayores problemas en lo que se refiere al suministro de agua y en las que la destilación es una alternativa importante, pero sin perder de vista otro factor importante que es la evaluación de la insolación en la superficie de la tierra, ya que gracias a ello podemos evaluar la cantidad de calor aprovechable en alguna zona en particular.

Para poder tener una idea de las ventajas que posee la destilación solar ante otros procesos de destilación mencionará, en forma breve, algunos de los principales procesos de desalación, no obstante, estos procesos serían obsoletos por sí solos si no contáramos con los medios adecuados para la captación del agua, por ello dedicamos un capítulo para comentar algunas de las formas más comunes para disponer de ella. Este último es un factor importante para un buen funcionamiento de la planta, y deberá tomarse en cuenta antes del diseño de la misma. del cuál se hará mención en el capítulo V, para finalizar con las conclusiones y recomendaciones en el capítulo VI del trabajo.

FIGURA 1.1
SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE



2. DESALACION Y ENERGIA SOLAR

2.1 BREVE HISTORIA DE LA DESALACION

El interés de la humanidad en el movimiento aparente del sol y en su influencia sobre todos los aspectos vitales del planeta es tan antiguo como el hombre mismo. Los tratados sobre el sol son tan remotos en la historia como los estudios religiosos, las organizaciones sociales o los rudimentos del desarrollo tecnológico,

Por otro lado, el empleo de la energía solar en procesos térmicos es mucho más reciente, aunque hay indicios de que el "efecto de invernadero" era ya conocido y usado por los antiguos egipcios, y que también éstos hacían uso del calor del sol para mover fluidos como el aire. Las aplicaciones de la energía solar a procesos de destilación de agua de mar son muy recientes, datan del siglo pasado, según reporta Talbert.

La conversión de agua salada en agua dulce es un problema que ha sido abordado desde hace muchos siglos y, para denotarlo podemos mencionar algunos de los antiguos pensadores, que realizaron experimentos con la desalacion del agua de mar como fueron Tales de Mileto, Demócrito, Aristóteles, Teofrasto y Plutarco quienes sostenían la idea de que el agua dulce era agua de mar filtrada a través de la Tierra.

No obstante, Aristóteles realizó intensos estudios de los que concluyó que los vapores del agua salada no contenían la sal, y que al filtrarse ésta a través del "Angeion Kerion", o pomo de cera, se obtenía el agua dulce. Por su parte, Plinio describió cómo aprovechar el agua de mar evaporada mediante vellones de lana, pero no fueron los únicos intentos, los filósofos árabes bizantinos también lo intentaron.

Tiempo después, en el renacimiento, se sugirió por primera vez el empleo de la energía solar como fuente de calor ideándose destiladores para barcos que debían realizar grandes viajes. Las primeras referencias del uso de éstos destiladores, fueron proporcionadas por Sir Richard Howkins y Pedro Fernández de Quiróz, siendo Haiton quien sugirió el uso de condensadores para mejorar el proceso, Sir William Walcot (Inglaterra) quien obtuvo la primera patente para procesos de destilación de agua de mar.

Otro gran estudioso fué Samuel Reyes, quien comprobó que el hielo conformado por agua de mar contenía menos sal que antes de ser congelada.

El llamado "periodo moderno" de la energía solar aplicada a la destilación comenzó en 1872, cuando Carlos Wilson, ingeniero sueco, instaló un gran destilador de caseta en las salinas del desierto del norte de Chile, que es una de las regiones más soleadas de la Tierra. Esta instalación, contaba con 4,700 m² de área efectiva de captación solar, dando servicio durante muchos años a una comunidad minera que extraía nitratos en el sitio. Constaba de varias hileras de destiladores, de 1.41 m de ancho por 61 m de largo, fabricados sobre bases y bastidores de madera. Usó tintes orgánicos de madera y alumbre para ennegrecer la superficie de captación y protegerla de la corrosión, ya que el agua que empleaba contenía sales con 140,000 ppm de sólidos totales. El arreglo hidráulico para el purgado oportuno de la salmuera era de primordial importancia.

Durante la segunda guerra mundial resurgió el interés en la técnica, tanto por las posibles aplicaciones de apoyo a las campañas militares, como porque en esa época azotaba una fuerte sequía a diversas regiones del mundo. Los grandes consorcios industriales de las naciones más desarrolladas veían en la desalación del agua marina

una potente solución y una enorme oportunidad de negocios. Se estudiaban procesos ambiciosos y sofisticados procurando altos volúmenes de agua salada, mayor eficiencia de producción y en general la tecnología que garantizaría el monopolio industrial de la obtención del líquido. Estas unidades se suministraban como parte del equipo de supervivencia de las balsas salvavidas que usaban la Marina y la Armada norteamericanas. Se han reportado 200,000 unidades fabricadas al efecto durante la primera mitad de la década de los cuarentas.

Hacia 1950, las experiencias acumuladas en la destilación solar del agua de mar auguraban un gran dinamismo en las investigaciones por venir. En paralelo, se exploraban muchas otras fuentes energéticas para el mismo efecto y un sinfín de tecnologías y principios físicos de desalación. La Universidad de California decidió en 1952 que la energía solar debería ser estudiada cada vez con más intensidad. Esta decisión estuvo apoyada en estudios que demostraban que los sistemas de destilación de etapas múltiples, ya en boga desde entonces, requerían fuertes cantidades de energía convencional. Ciertamente, la limitación no era tanto de costo como de viabilidad tecnológica. Por ejemplo; si se hubiese decidido suministrar toda el agua potable a la ciudad de Los Angeles en ese año destilando agua de mar en sistemas multietapa de diseño convencional quemando combustible, se hubiera requerido todo el petróleo que se producía entonces en todo el sur de California. Por este motivo, la mayor parte de las investigaciones del mundo en este tema se suspenderían a más tardar en 1970.

No obstante, durante el siglo XX se han desarrollado los procesos de destilación a gran velocidad, pero en la década de los setentas se vió entorpecido su desarrollo por la crisis energética.

Al final de la década de los setentas se inició la aplicación de procesos de congelamiento en pequeñas y medianas dimensiones. Entretanto los sistemas "convencionales" de desalación de agua de mar crecían en capacidad eficiencia y también en complejidad, sofisticación y dependencia de la energía del petróleo.

Tal vez el único país industrializado que continuó las investigaciones solares para este fin fue Australia, bajo los auspicios del C.S.I.R.O. (Commonwealth Scientific and Research Organization). Se hicieron notables avances tanto en la investigación

fundamental de los procesos físicos presentes en la destilación solar como en la comprensión y análisis de ingeniosos y novedosos diseños. Estos destiladores, como han demostrado numerosas veces los investigadores australianos, tienen diversos inconvenientes; entre ellos destacan su baja productividad (del orden de 4-5 litros diarios por unidad de 1 m^2 de área efectiva) y la relativa complejidad de operar varios de ellos en batería, sin embargo, al menos en las aplicaciones conocidas en México, esas limitaciones no han sido obstáculo cuando la necesidad de agua potable es apremiante habiendo disponibilidad de agua de mar y de energía solar.

La aplicación de la energía solar está en auge proyectándose con gran futuro; y esto es lógico ya que es energía gratuita. Además, es un proceso que no requiere personal calificado en la operación, como en otros procesos.

2.2. ANTECEDENTES DE LA DESALACION EN MEXICO

Si bien los logros de la tecnología nacional en esta aplicación rara vez han trascendido nuestras fronteras y la literatura internacional poco dice de ésta, las experiencias que se han acumulado en el país son muy ricas y variadas.

En la República Mexicana los trabajos sobre desalación se iniciaron con una planta experimental en Puerto Peñasco, Sonora, operada por un programa conjunto entre la Universidad Sonorense y la Universidad de Arizona.

En 1964 en la Cd de Rosarito, Baja California, la Comisión Federal de Electricidad instala dos plantas desaladoras con una capacidad de producción de $28,400 \text{ m}^3/\text{día}$, aprovechando las instalaciones de una termoeléctrica en dicha comunidad.

Al inicio de la década de los 70's la desalación solar masiva, en destiladores tipo caseta o invernadero, era ya una realidad con técnicas y materiales totalmente nacionales. La introducción del concepto se debe al Ing. Martínez Guerrero, entonces comisionado del Instituto de Geofísica de la UNAM, y de la llamada Comisión de Aprovechamiento de Aguas Salinas (CAAS, actualmente Instituto SEDUE), dependiente de la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Martínez Guerrero instauró un proceso de producción industrial en gran escala para fabricar docenas de estos dispositivos cada día en los propios talleres de la Comisión. Muchos de estos aparatos, tal vez cientos, están en uso continuo en Baja California Sur, y a la fecha la Delegación de SEDUE en dicho lugar se encarga de proporcionarles mantenimiento preventivo y correctivo a estas unidades.

No fue sino hasta 1970 cuando el "destilador de caseta" había establecido su utilidad (y sus limitaciones), no obstante, otras opciones ya se habían investigado. Una de ellas, pionera en el mundo, fue el proceso de humidificación-deshumidificación del aire a presión atmosférica, utilizada en la instalación de la planta de Puerto Peñasco, Sonora, la cual contaba con una capacidad de 18.9 m³/día. Esta instalación consistía en varias unidades o túneles de calentamiento solar por medio de aire, una torre de destilación y dos tanques de almacenamiento, contando además con un área de captación de 1,000 m², en cinco túneles de 2 m de diámetro por 100 m de largo cada uno.

Otra de las experiencias adquiridas fue: que conforme aumenta el número de veces que se reusa el calor del sol al paso del agua por cada calentador, aumenta la efectividad del empleo de la energía y se reduce el requerimiento de área de captación por unidad de volumen de agua potable producida, sin embargo, se reduce asimismo la diferencia de temperaturas entre el evaporador y el condensador, de modo que para mantener altos flujos de energía, se deben desarrollar superficies especiales de intercambio térmico.

Otro de los proyectos que adquirió gran importancia en México, fue el Plan llamado SONTLAN, el cual fue realizado en convenio con Alemania Federal. Incluía diversos procesos de conversión de energía, captadores avanzados de diversos diseños, sistemas pasivos para el confort de la vivienda, y entre esos, un destilador solar de segunda generación con una producción diaria de 25 lt. Estos equipos se instalarían también en Baja California Sur.

Hacia finales de los años setenta ya se contaba en México con experiencia en el diseño y operación de plantas destiladoras de efecto múltiple así como con una planta desaladora de 10 m³/día en la ciudad de La Paz, con captadores importados de Alemania y sistema destilador.

nacional.

Cabe destacar el proceso de evolución tecnológica que, en forma natural, llevó a los técnicos de DIGAASES a diseñar y construir con todo éxito, plantas solares, de múltiple efecto, con lo que habían entrado en contacto con la técnica al operar plantas convencionales multiefecto de flasheo (MSF) en la costa del Pacífico y estaban encargados de su operación y mantenimiento. También en lo que se refiere a la energía solar o convencional, en plantas MSF de diseño original, se han empleado materiales anticorrosivos de origen nacional. La primera planta destiladora, en en La Paz, fue conectada al sistema térmico solar suministrado por los Alemanes, la cual operó en su momento con todo éxito.

En 1982 se construyó la planta de 25 m³ en Las Barracas, BCS.

Hacia principios de 1985, tras una evaluación técnica favorable por parte de un grupo de consultores del CONACYT, se iniciaron las negociaciones para apoyar económicamente un estudio de factibilidad para la realización de un destilador solar en La Paz BCS, en el que serían "socios", el Instituto de Ingeniería de la UNAM y el Instituto Tecnológico de La Paz.

A finales de los 70's y principios de los 80's, personal Mexicano desarrolló tecnología cien por ciento nacional en los procesos de Evaporación Instantánea por Etapas, instalando plantas desaladoras por el primer proceso en Bahía de Tortugas B.C.S., con producción de 200 m³/día, Pichilingue B.C.S. con 1,000 m³/día y la rehabilitación de la planta de Cozumel Q.R. de 1,000 m³/día.

En lo que respecta a la Osmosis Inversa se instaló la primera planta nacional en el Ejido Miguel Hidalgo en S.L.P. con capacidad de 60 m³/día. Actualmente la principal aplicación de la ósmosis inversa en México es la de combatir el hidroarsenismo en la Comarca Lagunera.

2.3. PROBLEMÁTICA ACTUAL DEL PAÍS EN MATERIA DE DESALACION.

Uno de los problemas que por centurias ha impedido un desarrollo armónico en vastas regiones de la República Mexicana, es la carencia de agua de buena calidad que propicie, tanto el arraigo de los

pobladores a sus lugares de origen, como la integración de una infraestructura capaz de lograr el crecimiento de sus grandes potenciales económicos.

México es un extenso país con cerca de dos millones de kilómetros cuadrados, de los cuales un 87 % es desértico, árido y semiárido; también su situación geográfica y su herencia geológica han determinado sus increíbles contrastes naturales, como son exuberantes selvas, extensos desiertos y elevados picos con clima alpino, variando el nivel de insolación dependiendo del lugar de que se trate.

Por todo esto podemos apreciar que el desequilibrio hidráulico de México es notable y sus asentamientos humanos no corresponden a las disponibilidades de este vital recurso. Un indicador para poder visualizar este fenómeno es que el sureste del país tiene el 8 % de la población y el 40 % del agua potable disponible; en contraste, en el altiplano y la meseta del norte habita el 60 % de la población y sólo se cuenta con el 12 % del agua.

Por otra parte, México cuenta con diez mil kilómetros de litorales con un volumen incalculable de agua de mar, del cuál, sólo se consideran sus bellezas naturales, sus aspectos ecológicos, su potencial alimenticio o sus posibilidades de navegación y se ha desdeñado, quizá por inercia, su incalculable valor como fuente inagotable para la producción de agua potable, máxime que se cuenta con la tecnología para su aprovechamiento.

Los procesos de desalación logran el aprovechamiento de este recurso natural. Para desalar agua de mar y convertirla en potable o apta para diversos sectores industriales, existe desde hace mucho tiempo en el mundo una tecnología, que en nuestro país es de reciente aplicación.

Está plenamente demostrado que el caudal de agua dulce teóricamente movilizable mediante el ciclo hidrológico, será en breve insuficiente para abastecer a la nación, sobre todo por el crecimiento poblacional y una distribución tan heterogénea con respecto a los acuíferos disponibles.

Además las metas a corto, mediano y largo plazo del país, advierten un promisorio objetivo, la desalación como instrumento del crecimiento regional, sin olvidar que el tratamiento de las aguas de

mar es una tarea de incalculable valor, sobre todo si se consideran las grandes zonas desérticas, que en elevado porcentaje se distribuyen en el territorio nacional, como antes se dijo.

A continuación se mencionan algunas ciudades que fueron agrupadas en dos contextos con base en su escasez actual y futura de agua:

- 1) Ciudades con escasez actual (las fuentes de abastecimiento de agua dulce están en su límite de explotación o se les suministra con recursos de otras regiones):

Mexicali.	San Luis Río Colorado.
Tijuana.	Ensenada.
La Paz.	Nogales.
Hermosillo.	Guaymas.
Empalme.	Tepic.
Cd. Juárez.	Nuevo Laredo.
Matamoros.	Reynosa.
Saltillo.	Torreón (Gomez Palacio).
Laredo.	Zacatecas.
Fresnillo.	San Luis Potosí.
Sahagún.	Pachuca.
Celaya.	León.
Toluca.	Yucatán.
Durango.	Comarca Lagunera.
Cosahuila.	Cd. de México.
Naucalpan.	Cd. Nezahualcóyotl.

- 2) Ciudades de escasez futura (las fuentes regionales de abastecimiento cubren las necesidades de agua dulce):

Culiacán.	Ciudad Obregón.
Navojoa.	Cuernavaca.
Puebla.	Nueva Rosita.
Monclova.	Querétaro.
Salamanca.	Guaymas.

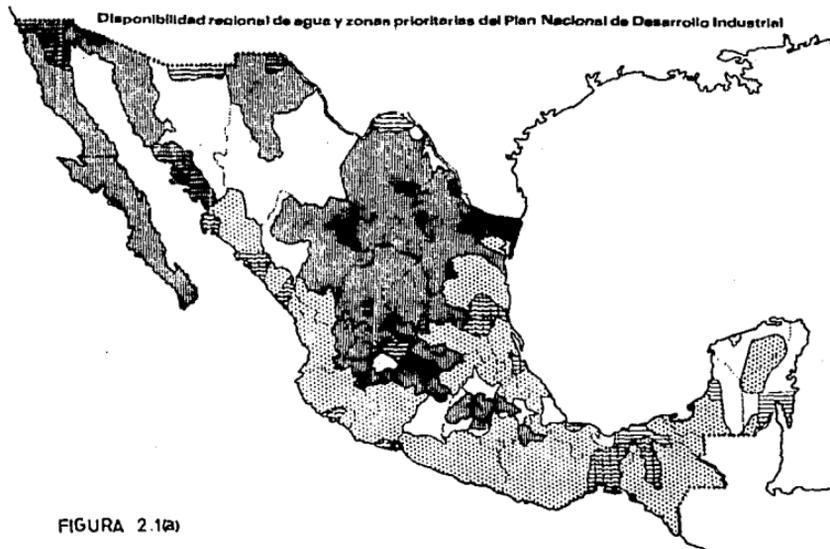


Figura 2.1.- Relación entre regiones de escasa población respecto con las que tienen mayores recursos.

La desalación se presenta como una alternativa natural en lugares donde existen recursos marinos, que garantizan el abastecimiento a largo plazo, además, el potencial económico de las vastas regiones mencionadas permanece atargado por falta de una infraestructura que permita su desenvolvimiento.

Los costos de producción y distribución del servicio son mínimos frente a las graves carencias que soportan cientos de miles de mexicanos. Por señalar un ejemplo; mitigar la sed con un refresco embotellado representa actualmente una erogación de aproximadamente doscientos cincuenta pesos por 350 ml, en cambio por la misma cantidad de agua potable puesta en el domicilio (en el D.F.), se tiene un costo de \$16.00 por litro.

Debemos tener muy en cuenta que con la desalación no se pretende resolver el problema de riesgo agrícola, ya que las limitaciones al respecto, son básicamente referentes al volumen de agua producido con



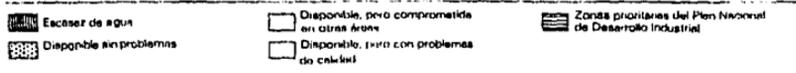
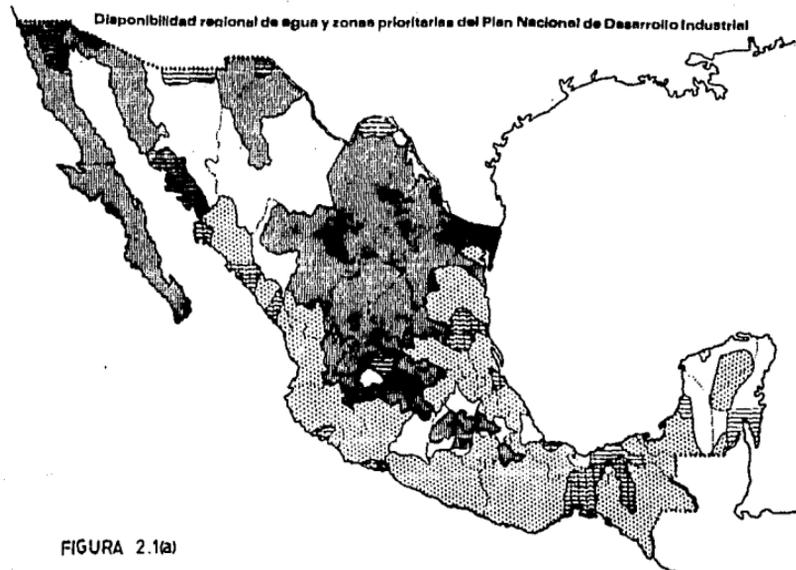




FIGURA 21(b)

- 1 Con conflicto actual y futuro
- 2 Con conflicto futuro
- 3 Con conflicto actual, pero con fuentes alternativas de abastecimiento sin conflicto
- 4 Sin estudios de aguas subterráneas, pero con evidencias de éstas
- 5 Sin conflictos hasta el año 2000
- 6 Con conflictos actuales de calidad del agua.

1 Toluca	25 Orizaba	46 León	71 Aguila
2 Mazatlán	26 Guadalupe	48 Lagos de Moreno	72 Uruapan
3 Ensenada	27 Los Mochis	50 Aguascalientes	73 Lázaro Cárdenas
4 San Luis Río Colorado	28 La Paz	51 Tlaxc.	74 Comaa
5 Nogales	29 Culiacán	53 Puerto Valente	75 Tlaxiaco
6 Cd. Juárez	30 Mazatlán	53 Ocotlán	76 Zihuatenejo
7 Hermosillo	31 Durango	54 Zamora	77 Acapulco
8 Guaymas	32 Tijuana	55 Toluca	78 Chetumal
9 Empalme	33 Zacatecas	56 Morelia	79 Tehuacán
10 Cd. Obregón	34 Minahuatl	57 Zihouero	80 Durango
11 Navojoa	35 San Luis Potosí	58 Toluca	81 Coahuila de Zaragoza
12 Cuahutémoc	36 Cd. Victoria	59 Mérida	82 Salina Cruz
13 Chihuahua	37 Cd. Mante	60 Cd. Sahagún	83 Acapulco
14 Dahuatl	38 Cd. Velasco	61 Apaxtlan	84 Tuxtla Gutiérrez
15 Huixtla del Parí	39 Tuxtla	62 Jalapa	85 Cárdenas
16 Piedras Negras	40 Pinar Rica	63 Veracruz	86 Vies Hermosa
17 Huehuetlán	41 Tulumcayo	64 Córdoba	87 Campeche
18 Nvo Laredo	42 Pachuca	65 Orizaba	88 Chetumal
19 Morelia	43 San Juan del Río	66 Tlaxcala	89 Mérida
20 Matamoros	44 Quintana Roo	67 Puebla	90 Tampico Cd. Aldero
21 Reynosa	45 Craya	68 Iruar de Matamoros	91 Tuxtla
22 Monterrey	46 Sinaloa	69 Cuernavaca	92 Cancun
23 Sinaloa	47 Guaymas	70 Cuernavaca	93 Ciudad del Carmen
24 Tenejón Gómez Pichón Lerdo			



- | | |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. VALLE PESCADEROS | 20. MARGEN IZQUIERDA DEL RIO SINALOA |
| 2. VALLE TODOS SANTOS | 21. VALLE DE JUAREZ |
| 3. VALLE LA PAZ | 22. VALLE VILLA AHUMADA |
| 4. VALLE SANTO DOMINGO | 23. VALLE DE JANOS |
| 5. VALLE EL VIZCAINO | 24. CASAS GRANDES |
| 6. VALLE SAN QUINTIN | 25. VALLE ALDAMA |
| 7. VALLE DE MANADERO | 26. VALLE JIMENEZ CAMARGO |
| 8. VALLE OJOS NEGROS | 27. COHARCA LAGUNERA |
| 9. VALLE REAL DEL CASTILLO | 28. VALLE CALERA |
| 10. VALLE LAS PALMAS | 29. VALLE DE LORETO |
| 11. VALLE DE MEXICALI | 30. VALLE DE LEON |
| 12. MESA ARENOSA DE SAN LUIS | 31. ZONA DE LAGUNA SECA |
| 13. COYOTE COSTA | 32. BAJIO CELAYA |
| 14. VALLE BISANI | 33. VALLE DE QUERETARO |
| 15. PITTIQUITO-CABORCA | 34. VALLE DE TOLUCA |
| 16. VALLE EL SAHUARAL | 35. VALLE DE MEXICO |
| 17. COSTA DE HERMOSILLO | 36. CAMPO MINA DE MONTERREY |
| 18. SAN JOSE DE GUAYMAS | |
| 19. VALLE DE GUAYMAS | |

Figura 2.1 (c)



respecto al requerido.

Hasta ahora la aplicación de la desalación en México, puede resumirse en los siguientes rubros:

- a) Para el consumo doméstico en comunidades que carezcan del vital elemento o para complementar el gasto en alguna fuente existente, como es el caso en los Estados de Baja California Norte, Baja California Sur, Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, Tamaulipas y Quintana Roo.
- b) Para el fomento Turístico, mediante el suministro a hoteles, centros recreativos, instalaciones para yatismo, etc., como en los casos de Cozumel, La Paz e Isla Mujeres.
- c) Para el desarrollo pesquero en las empacadoras de zonas costeras, como es el caso de varias comunidades del Estado de Baja California Sur, Bahía de Tortugas y Punta Eugenia.
- d) Para el desarrollo industrial, sobre todo en la explotación de los recursos no renovables, como lo hace Petróleos Mexicanos en desiertos y plataformas marinas.
- e) Usos específicos en la industria química y alimenticia.
- f) Mejorar la calidad de agua de consumo humano contaminada por elementos tóxicos como el arsénico y el flúor en la Región Lagunera (Coahuila y Durango), mediante la ósmosis inversa.
- g) Producción de agua ultrapura para uso de calderas en la industria.
- h) Industria hielera para la elaboración de cubos.

Para conseguir estos objetivos se emplean algunas estrategias como son:

- a) La investigación y desarrollo de tecnologías propias en desalación de agua de mar.
- b) Selección de los procesos idóneos, para fortalecer una tecnología propia en la materia.
- c) El estudio y selección de materiales resistentes a la corrosión.
- d) El estudio y aplicación racional del inventario de aguas saladas.
- e) La formación y capacitación del personal técnico necesario.

Por fortuna las tecnologías existentes han tenido un desarrollo acelerado en las últimas décadas, quedando todavía mucho por investigar. En la siguiente gráfica podemos apreciar los potenciales de desalación que poseen algunos países, incluyendo a México.

También deben considerarse los abundantes acuíferos salados intercontinentales en espera de ser aprovechados para hacer productivas innumerables riquezas naturales que permanecen inexploradas por la carencia del agua potable.

Algunas entidades que pueden aprovechar este recurso podrían ser las que se mencionan a continuación:

Baja California Norte y Sur

El Estado de Baja California Sur presenta aproximadamente 2,200 Km de litorales. Se sitúa en las latitudes donde se localizan los grandes desiertos, por lo que las precipitaciones son escasas y en ocasiones nulas, por lo tanto no existen propiamente ríos. La fuente principal la constituyen mantos acuíferos que son escasos debido a su lenta renovación.

Sonora

Está situado en una de las zonas más áridas del territorio y su disponibilidad de recursos hidráulicos es en general pobre, aunque presenta algunos contrastes.

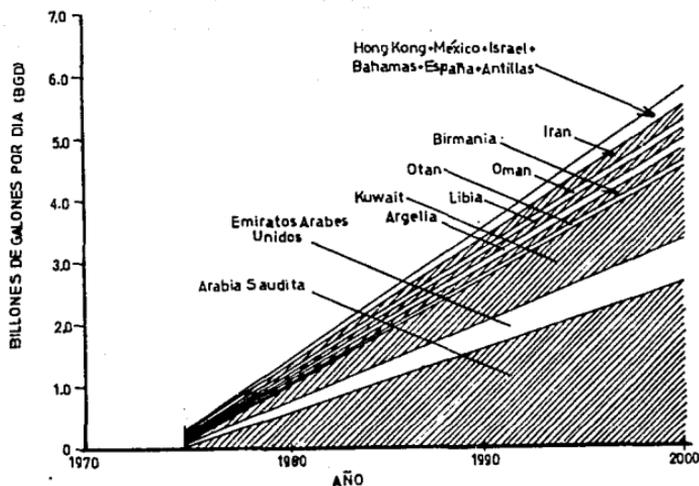


Figura 2.2.- Estimación del potencial de desalación de los principales países que utilizan técnicas de desalación.

En la porción árida se encuentran Hermosillo Guaymas y Caborca, que se caracterizan por su productividad y tecnificación, pero éstas características están relacionadas con un agotamiento gradual de las fuentes subterráneas. Su sobreexplotación está ocasionando la inutilización de los acuíferos ocasionando efectos perjudiciales.

Oaxaca

Las condiciones geológicas adversas y una topografía muy accidentada son factores que no favorecen el almacenamiento de cantidades importantes de agua en el subsuelo. Los acuíferos granulares tienen baja capacidad de almacenamiento a causa de su granulometría y de su reducida extensión superficial.

El acuífero del Valle del Etla, en la parte central del estado es la principal fuente de abastecimiento de agua a la capital de Oaxaca,

aunque es insuficiente para satisfacer las demandas de agua potable en un futuro inmediato, siendo la fuente complementaria el Valle de Zimatlán.

Quintana Roo

Las formaciones calcáreas que se localizan en la extensión de la entidad determinan en general una considerable abundancia potencial en sus recursos de aguas subterráneas, las cuales ya están siendo explotadas para su aprovechamiento en usos de riego, industrial y agua potable.

En la porción noreste cercana a la costa, incluyendo la isla de Cozumel y Cancún, donde los desarrollos turísticos están demandando fuentes de agua de buena calidad, ésta se encuentra en el subsuelo, pero su explotación sólo debe hacerse mediante un estricto control en la profundidad de sus captaciones debido a lo delgado del manto de agua dulce renovable.

Estas entidades tienen en común las siguientes características generales.

- Están localizadas en zonas desérticas (excepto Quintana Roo), lo cual provoca que su precipitación pluvial sea mínima.
- Sus mantos subterráneos presentan una renovación lenta y se les llega a considerar no renovables.
- En ocasiones estos mantos son de dimensiones reducidas, impidiendo el almacenamiento de agua.
- La topografía es accidentada provocando que el agua se pierda.
- Ser zonas escasas en agua dulce, pero abundantes en agua salada.

2.4. BREVE HISTORIA DE LA ENERGIA SOLAR

La tierra recibe del Sol diariamente, grandes cantidades de energía, de las cuales el hombre sólo utiliza una pequeñísima proporción. La energía solar es la fuente de vida, pues gracias a ella crecen las plantas que han de servir de alimento a los animales y al hombre. La madera, el carbón y el petróleo son, en última instancia, energía solar almacenada a lo largo de muchos siglos.

La primera utilización consciente de la energía solar por parte del hombre fue quizás, la realizada por Arquímedes. Dícese que Arquímedes consiguió quemar las naves romanas que asediaban Siracusa concentrando sobre ellas los rayos solares. La concentración fue lograda utilizando los brillantes escudos de los soldados.

En el siglo XVII, E. W. Tschirnhaus usó un espejo de cobre parabólico de un metro de radio, como horno para hacer porcelana. El "efecto de invernadero", que tanto interés tiene en un gran número de aplicaciones de la energía solar, fue descubierto por un científico sueco, Sosses, en la segunda mitad del siglo XVIII. Casi un siglo tarde empieza la implantación, cada vez más extensa, de sencillos dispositivos para calentar agua mediante la energía solar.

En el curso de los últimos años se ha despertado una corriente de interés hacia la energía solar, tanto en los países altamente industrializados, como en los que se encuentran en vías de desarrollo. A ello ha contribuido, en gran medida, la crisis energética surgida a finales de 1973.

Una prueba del creciente interés que suscita la adecuada utilización de la energía solar puede encontrarse en la organización, cada vez más frecuente, de congresos internacionales en los que participan numerosas naciones. Como ejemplo, se puede señalar el simposio que tuvo lugar en Phoenix (Arizona, EE. UU.), en noviembre de 1985, y al que asistieron especialistas de treinta y cinco naciones.

En 1981, después de un seminario sobre las aplicaciones de la energía solar celebrado en Grecia, se fundó la Cooperación Mediterránea para el Estudio de la Energía Solar (COMPLES). En 1983 se amplió esta asociación, y actualmente, pertenecen a COMPLES no sólo los países mediterráneos, sino otros como Australia, Brasil, Chile, India, Colombia, Japón, México, Arabia, Perú, etc.

COMPLES está instalado actualmente en Marsella. Allí se recogen estudios y trabajos de todo el mundo, y existe además, un archivo de patentes en conexión con el Instituto de la Propiedad Industrial. Por otra parte, además de convocar y participar en las reuniones internacionales, celebra amenudo mesas redondas donde se debaten y ponen al día los últimos avances sobre la técnica del aprovechamiento de la energía solar.

En Inglaterra se publica bimestralmente una revista titulada Solar Energy. Esta es el boletín oficial de la Sociedad Internacional de la Energía Solar (ISES) que se dedica exclusivamente a la divulgación de la ciencia y tecnología de las aplicaciones de la energía solar. Fue fundada en 1954, y a ella pueden pertenecer personas, instituciones y compañías de todo el mundo.

De todo lo anterior se deduce que la energía solar ha tenido un desarrollo muy lento. En líneas generales, no es difícil encontrar razones que expliquen este fenómeno aparentemente tan insólito. En el siglo XVIII, cuando se descubrió el "efecto de invernadero", la energía procedente de las fuentes tradicionales era tan abundante y barata, que era difícil imaginar que la energía solar fuera algún día competitiva. Más tarde, casi al mismo tiempo que se funda ISES, surge la posibilidad de una utilización por parte del hombre de la energía nuclear, y aunque acompañadas de acres controversias, están ya en funcionamiento centrales nucleares, y no centrales solares. Entre otras razones para explicar este hecho, no se debe olvidar que existe una diferencia fundamental entre la energía solar y la energía nuclear: la energía solar en ningún caso puede utilizarse para fines bélicos, mientras que una central nucleoelectrónica puede ser una fábrica de bombas atómicas en potencia.

En determinadas aplicaciones (desalación de agua de mar, obtención de agua caliente, climatización de piscinas, calefacción de viviendas), la energía solar es ya una "realidad comercial", y en este aspecto, en algunas regiones compite perfectamente con otros tipos de energía.

2.5. PRINCIPALES ASPECTOS TEORICOS RELATIVOS CON LA ENERGIA SOLAR

El sol, como todo cuerpo caliente, emite sin cesar lo que se llama energía radiante o, simplemente, radiación. La energía radiante se propaga por medio de ondas electromagnéticas de distinta frecuencia. La figura 2.3 muestra la amplia gama de frecuencias que cubren las radiaciones electromagnéticas.

De este espectro son especialmente interesantes las siguientes regiones:

a) Infrarrojo.

b) Visible.

c) Ultravioleta.

Esta última región está formada por las frecuencias a las cuales es sensible nuestra retina. Las diferentes sensaciones que la luz produce en el ojo, y que se llaman colores, dependen de la frecuencia de la onda electromagnética. Dado su especial interés, esta zona del

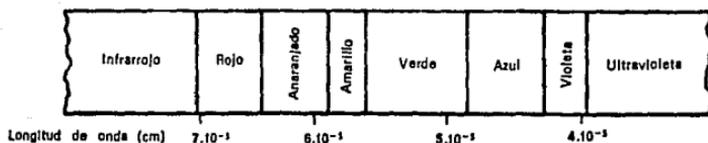


Figura 2.3.- Espectro de la radiación electromagnética.

espectro electromagnético se muestra ampliada en la figura 2.4 . En ella se pone de manifiesto la relación que existe entre el color y la frecuencia.

Estas regiones del espectro electromagnético son de sobremañera atractivas para nuestro estudio, pues entre ellas se distribuye la energía emitida por el sol. En la figura 2.5 se muestra cómo tiene lugar dicha distribución.

La cantidad de energía recibida, por unidad de tiempo y superficie, en cada intervalo de longitud de onda, viene dada por el área de la superficie limitada por la curva, el eje de abscisas y las coordenadas correspondientes al rango de longitudes de onda elegido.

Baja energía	Ondas de radio y televisión	Microondas		Infrarrojo	Visible	Ultravioleta	Rayos X	Alta energía
Longitud de onda (cm)	1	0,1	10^{-2}	10^{-1}	10^{-4}	10^{-7}	10^{-8}	
Frecuencia (seg ⁻¹)	$3 \cdot 10^{10}$		$3 \cdot 10^{11}$		$3 \cdot 10^{14}$		$3 \cdot 10^{16}$	
Energía del fotón (julios)	$2 \cdot 10^{-18}$		$2 \cdot 10^{-18}$		$2 \cdot 10^{-18}$		$2 \cdot 10^{-18}$	

Figura 2.4 .- Espectro de la luz visible.

Se observa así, que la mayor parte de la energía solar (aproximadamente un 90 %) se emite en forma de luz visible y en el infrarrojo, correspondiendo sólo una fracción muy pequeña al ultravioleta.

En la figura 2.5 se muestra la distribución energética de la radiación solar, medida antes de que atraviese la atmósfera, y su distribución a nivel del mar, suponiendo un día exento de nubes. En este último caso, se observa una disminución de intensidad que se debe a los fenómenos de absorción y difusión que tienen lugar mientras la energía solar atraviesa la atmósfera terrestre.

Estos fenómenos de absorción y difusión y, por tanto, la intensidad de la radiación solar a nivel de la Tierra, dependen:

- a) De la longitud que los rayos solares recorren en la atmósfera terrestre.

Según la figura 2.6, dicha longitud varía con la altitud solar aparente, y por tanto, depende de la situación geográfica del lugar donde se mide la intensidad de la radiación solar y, para un mismo sitio, de la época del año.

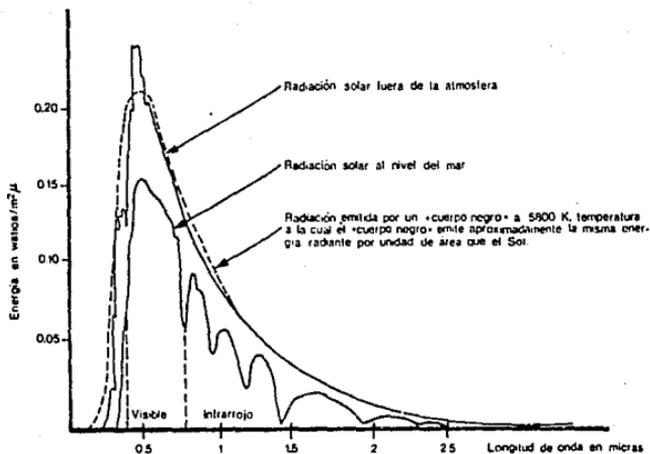


Figura 2.5. Distribución energética de la radiación solar.

b) De la composición de la atmósfera. Se ha observado que la mayor reducción de la intensidad de la radiación solar se debe al vapor del agua y al bióxido de carbono, y que depende, en gran medida, del grado de contaminación atmosférica.

Mientras que en la estratósfera el valor medio de la potencia suministrada por la radiación solar es de unos $1,350 \text{ W/m}^2$, en la superficie se observa un máximo de 800 a $1,200 \text{ W/m}^2$, según el lugar, las condiciones atmosféricas y la época del año.

La radiación solar que incide sobre la superficie terrestre es de dos clases: radiación primaria o directa y radiación difusa (figura 2.7).

En días nublados, la radiación directa prácticamente no existe; la radiación que llega a la Tierra es, en gran proporción, radiación difusa. Las nubes no absorben mucha energía, pero sí son causa de la difusión de la radiación solar.

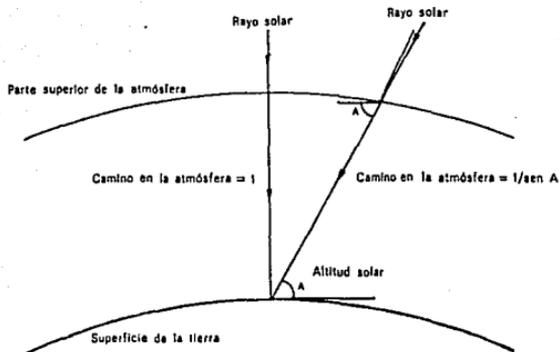


Figura 2.6. El camino recorrido por el rayo solar dentro de la atmósfera depende de la altitud solar aparente.

Es interesante indicar, que la única radiación susceptible de ser concentrada es la radiación directa. En contraste, un captador solar sin concentración (colector de placa plana) aprovecha tanto la radiación directa como la difusa; precisamente la principal ventaja de este último tipo de captadores solares reside en que permiten importantes ganancias de energía aun con cielo cubierto.

La cantidad de energía solar que alcanza la Tierra es colosal, más que suficiente en principio para abastecer todos nuestros gastos de energía previsible en un futuro. La energía solar térmica disponible a la distancia media entre la Tierra y el Sol, fuera de la atmósfera terrestre, es de $0.139 \text{ vatios/cm}^2$, y la cantidad de energía solar interceptada por la superficie que ofrece el disco terrestre es de 17.7×10^6 vatios.

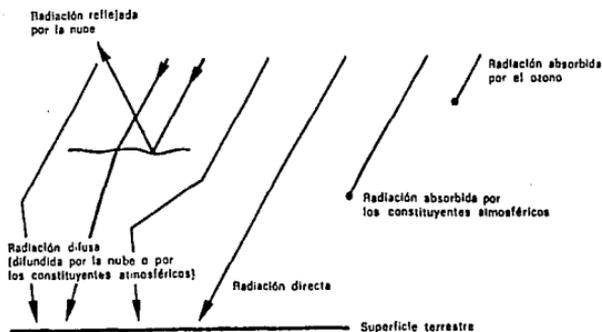


Figura 2.7. Interacción de la radiación solar con la atmósfera.

Estas cifras representan aproximadamente 100.000 veces la capacidad de energía eléctrica comprendida en las instalaciones que existen actualmente en todo el mundo.

La cantidad de energía solar disponible en la superficie de la Tierra sería de $0.024 \text{ vatios/cm}^2$ aproximadamente, calculado como media a lo largo de todo el día. Esta cifra es ligeramente superior a $1/3$ de su valor fuera de la atmósfera.

Puesto que el sol no es sólido, la rotación de sus distintas capas varía con la latitud solar. La composición del sol cambia desde el núcleo donde se comporta como un plasma, hasta el exterior donde existen masas gaseosas. Podemos considerar que su aparente "superficie" llamada fotosfera, está cubierta por la cromósfera, la corona interior y la corona exterior.

En el cuadro 2.1 se presentan algunas de las características más importantes del sol.

2.6. FACTORES QUE DETERMINAN LA IRRADIACION SOLAR EN MEXICO

Puesto que el eje de rotación de la Tierra está inclinado $67^{\circ} 27'$ respecto a su plano de traslación alrededor del sol (eclíptica), el ángulo formado entre el Ecuador terrestre y el plano de la eclíptica es de $23^{\circ} 27'$ (Figura 2.8.).

Conforme la Tierra se traslada, los rayos solares llegan a ésta con distintas inclinaciones (Figura 2.9). Durante los equinoccios (21 de marzo y 23 de septiembre), al mediodía inciden perpendicularmente en el Ecuador (Figura 2.10) y en cualquier otra latitud a un ángulo equivalente a 90° menos la latitud local (colatitud). En los solsticios (22 de junio y 22 de diciembre), al mediodía, los rayos solares inciden perpendicularmente en el Trópico de Cáncer, al que le corresponde los $23^{\circ} 27' N$ (Figura 2.11) y Capricornio, al que le corresponde los $23^{\circ} 27' S$. Para latitudes mayores a $\pm 23^{\circ} 27'$, nunca llega a estar el sol en el cenit (Figuras 2.12 y 2.13), mientras que para latitudes intermedias entre esos paralelos, este fenómeno ocurre dos veces al año (Figura 2.11) en las fechas en que coincide la declinación solar con la latitud local.

CUADRO 2.1. ALGUNAS CARACTERISTICAS DEL SOL.

CARACTERISTICA	CANTIDAD
- Edad.	Aproximadamente 4,700 millones de años.
- Distancia promedio a la Tierra.	149.6 millones de Km. $\pm 1.5\%$.
- Area aproximada de la superficie solar.	5.09×10^{22} Km ² . (11,030 veces la de la Tierra).
- Masa.	1.99×10^{30} . (333 mil veces la de la Tierra)

CUADRO 2.1. (CONTINUACION)

CARACTERISTICA	CANTIDAD
- Temperatura del núcleo.	Entre 12 y 15 millones de °K.
- Temperatura de la fotosfera.	Aproximadamente 6,000 °K.
- Temperatura de la corona.	De 800,000 a 3,000,000 °K.
- Composición química de la fotosfera.	Hidrógeno: 73.45 % Nitrógeno: 0.09 % Helio: 24.85 % Silicón: 0.07 % Oxígeno: 0.77 % Magnesio: 0.05 % Carbono: 0.29 % Hierro: 0.16 % Neón: 0.12 % Otros: 0.01 %
- Irradiación solar fotosférica.	6.6×10^4 Kwatt/m ² .
- Potencia solar total.	3.9×10^{26} watts.
- Energía emitida anualmente por el Sol.	Aprox. 1.2×10^{31} Kjoules.
- Transformación solar instantánea de materia en energía.	4 millones de toneladas/seg.
- Potencia interceptada por el disco diametral terrestre.	1.73×10^{14} Kwatts. (Sección diametral terrestre: 1.275×10^{14} m ²).

Las condiciones descritas anteriormente ocasionan las estaciones del año, y los diferentes soleamientos a distintas latitudes.

Es conveniente definir el soleamiento como el tiempo con disponibilidad de sol directo. Se sugiere emplear la palabra soleamiento y no asoleamiento, dado que asolear implica la acción de

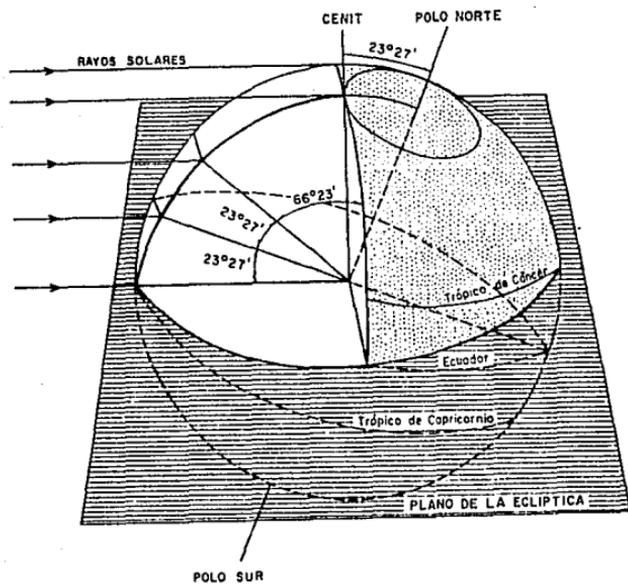


Figura 2.3 Principales características geográficas del planeta

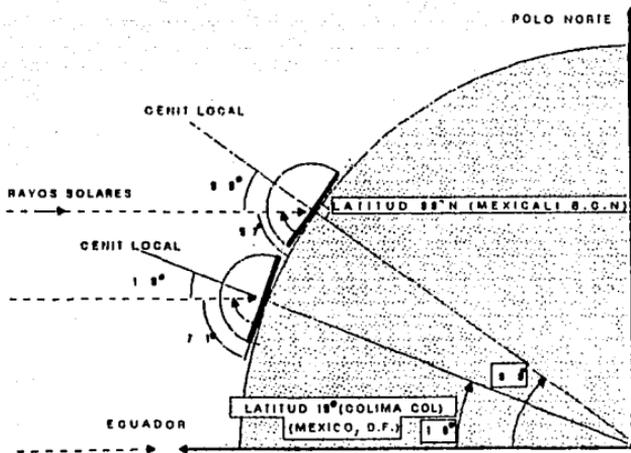


Figura 2.9 Variación de la incidencia de los rayos solares con la latitud geográfica.

secar al sol algún objeto, mientras que soleado denota la acción directa del sol sobre cierto entorno.

Por otro lado, irradiación, es la energía que en forma de radiación se integra o totaliza durante cierto tiempo en una superficie, sus unidades son joules/m² o cal/cm² (llamado langley: ly) o Kwatt-hora/m².

Los tres factores que causan los distintos niveles de irradiación solar sobre la superficie terrestre son los siguientes:

1. La altura solar en el sitio durante los meses del año.
2. La irradiación extraterrestre a la latitud considerada.
3. La transparencia de la atmósfera local.

En consecuencia, mientras que la irradiación solar sobre un elemento de superficie horizontal en el límite superior de la atmósfera, solamente depende de la época del año y la latitud geográfica, la irradiación solar que finalmente recibe el suelo, es resultado de una atenuación producida por las nubes y constituyentes atmosféricos, quienes reflejan, dispersan y absorben la radiación solar (Figura 2.14).

Observando el mapa de la Figura 2.15, en el que se nos muestra la Irradiación Solar Global Media Anual podemos apreciar que la República Mexicana es una zona intensamente irradiada, si bien no de manera general ni uniforme, pues los valores más elevados de irradiación global se presentan en el noroeste del país, mientras que la vertiente del Golfo de México y al sur del territorio nacional la nubosidad es máxima y la irradiación mínima. De cualquier manera, el recurso solar es abundante durante todo el año en las latitudes intertropicales, y en su verano respectivo en aquellas situadas alrededor de los 35°, donde se localizan las principales zonas áridas del planeta. Es evidente que el efecto combinado de la particular circulación atmosférica en nuestras latitudes, con el de la irregular orografía nacional y sus marcadas variaciones altimétricas, configuran las extensas zonas áridas del planeta (Figura 2.16).

2.7. ALGUNOS REGISTROS DE INSOLACION EN MEXICO

En el siguiente cuadro se resumen datos de irradiación solar relacionandolos con la extensión del territorio nacional:

CUADRO 2.2
CATEGORIAS DE NIVELES DE IRRADIACION SOLAR EN LA REPUBLICA
MEXICANA Y EXTENSION TERRITORIAL COMPRENDIDA

CATEGORIA	NIVELES DE IRRADIACION (cal/cm ² -día)	% DEL TOTAL DEL TERRITORIO NAL.	EXTENSION APROX.* (Km ²)
I	Q > 500	38	749,570
II	400 < Q < 500	57	1'124,350
III	Q < 400	5	98,627

En el cuadro 2.3 se resumen algunas de las radiaciones globales para algunas de las localidades de la República Mexicana. Estos datos son importantes para comenzar cualquier proyecto en el cual se haga uso de la energía solar.

* Considerando que la extensión total del territorio nacional es de 1'972,547 Km².

CUADRO 2.3.
 RADIACION GLOBAL "Q" MAXIMA-MAXIMORUM MENSUAL CALCULADA
 (cal/cm²-día)

MES	LOCALIDAD	Q
ENE	San Luis de la Loma, Gro.	511
FEB	Cihuatlán, Jal.	591
MAR	San Luis de la Loma, Gro.	616
ABR	Chilpancingo, Gro.	692
MAY	Punta Peñasco, Son.	725
JUN	Punta Peñasco, Son.	716
JUL	Guerrero, Tamps.	702
AGO	Jesús María, Nay.	667
SEP	Sierra Giganta, B. C. S.	600
OCT	La Paz, B. C. S.	513
NOV	Chilpancingo, Gro.	531
DIC	Juquila, Oax.	509

CUADRO 2.4
RADIACION GLOBAL "Q" MAXIMA-MINIMORUM MENSUAL CALCULADA
(cal/cm²-día)

MES	LOCALIDAD	Q
ENE	Guerrero, Tamps.	217
FEB	Camargo, Tamps.	302
MAR	Tampico, Tamps.	372
ABR	Ozulama, Ver.	412
MAY	Ozulama, Ver.	454
JUN	Tuxtla Gutiérrez, Chi.	422
JUL	Tequisistlán, Oax.	334
AGO	Tequisistlán, Oax.	328
SEP	Cosamaloapan, Ver.	253
OCT	Unión, Coah.	290
NOV	Cosamaloapan, Ver.	248
DIC	Cosamaloapan, Ver.	231

Para complementar las tablas anteriores, a continuación se encuentran las figuras 2.17, 2.18 y 2.19.

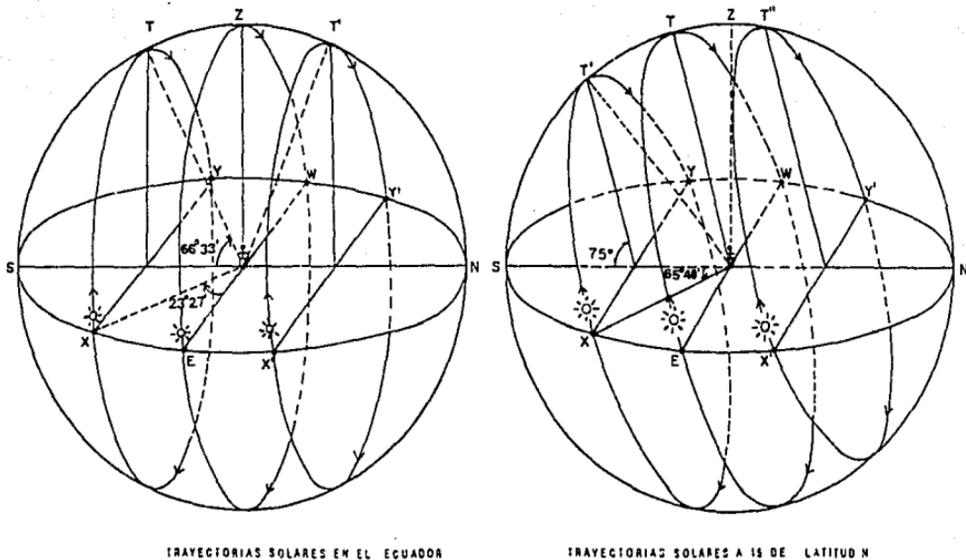


FIGURA 2.10

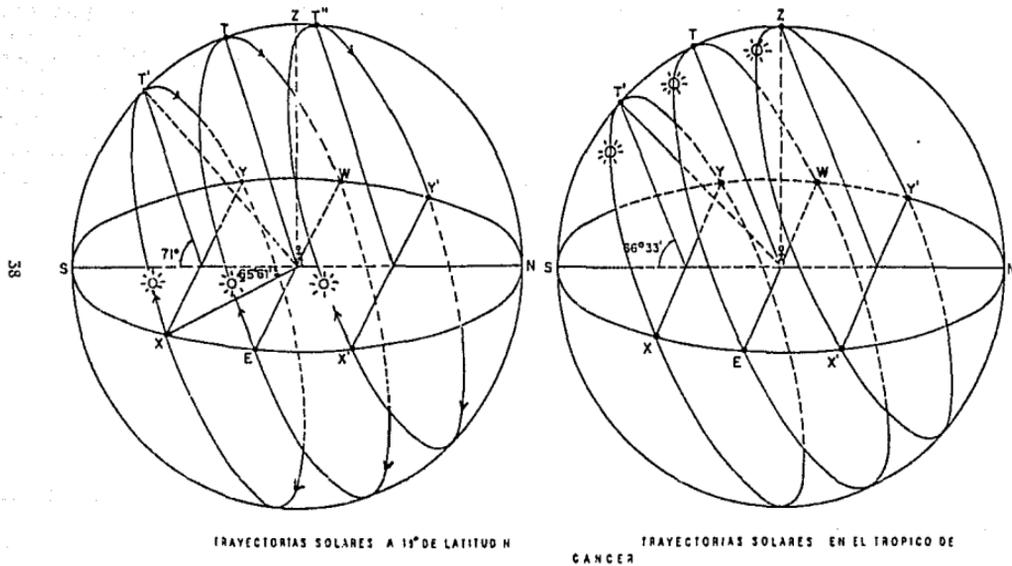
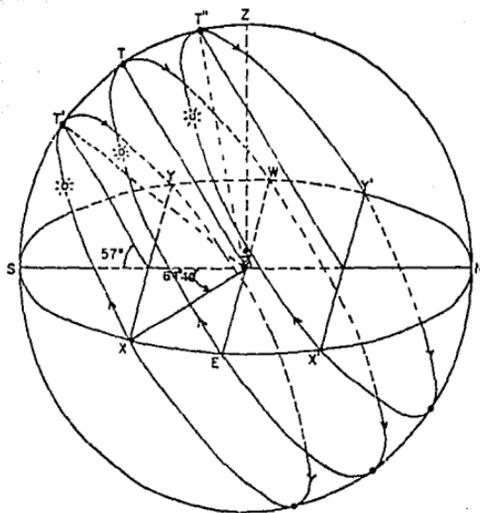
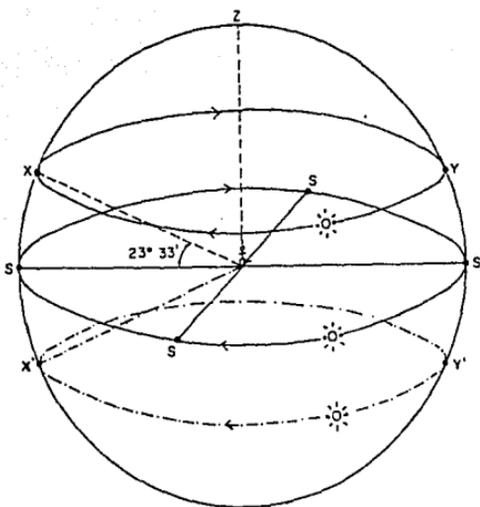


FIGURA 2.11

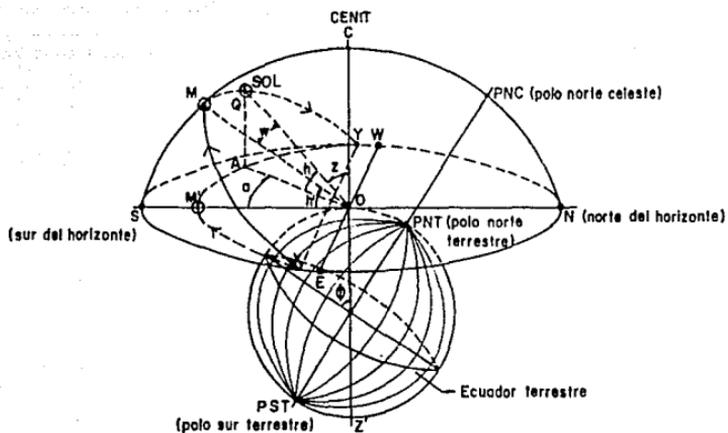


TRAYECTORIAS SOLARES A 33° DE LATITUD N



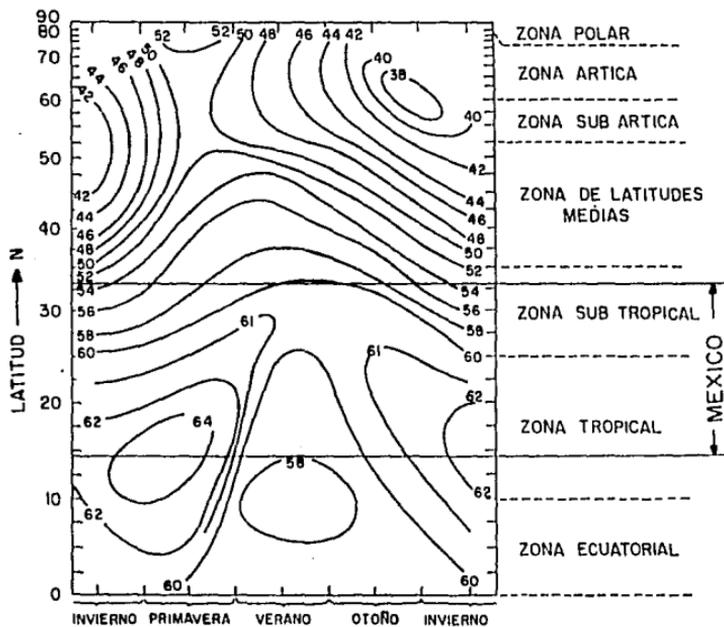
TRAYECTORIAS SOLARES EN EL POLO NORTE

FIGURA 2.12



TRAYECTORIA APARENTE DEL SOL

FIGURA 2.13



PORCENTAJE DE LA IRRADIACION SOLAR RECIBIDA EN LA SUPERFICIE TERRESTRE RESPECTO A LA EXTRATERRESTRE

FIGURA 2.14

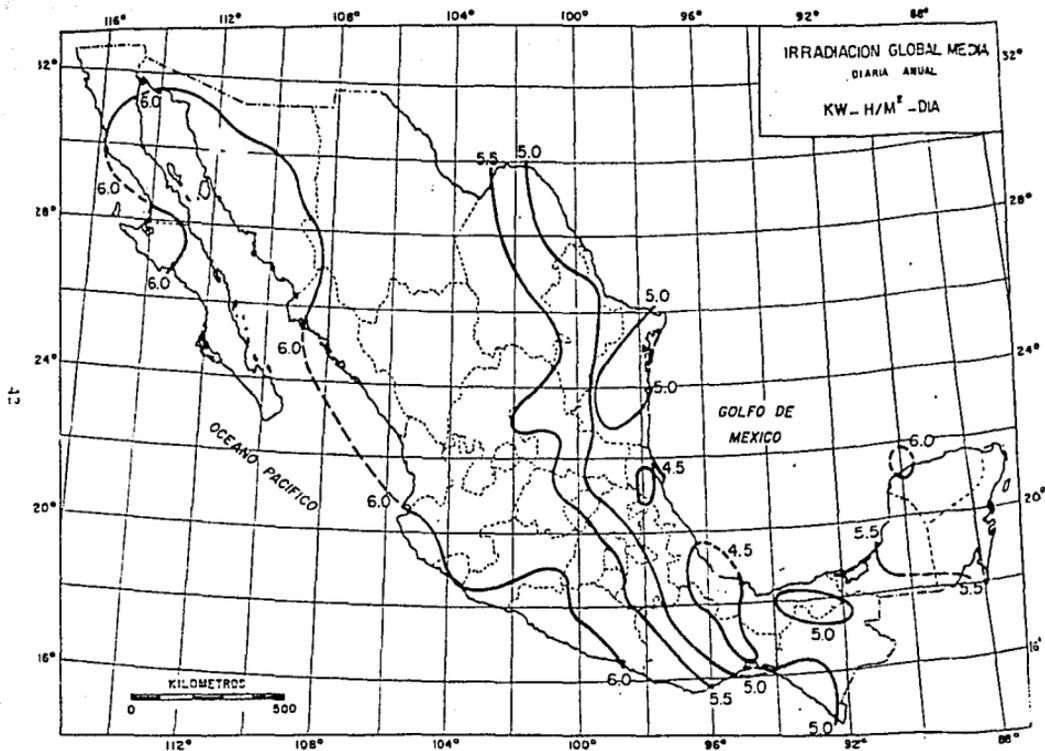
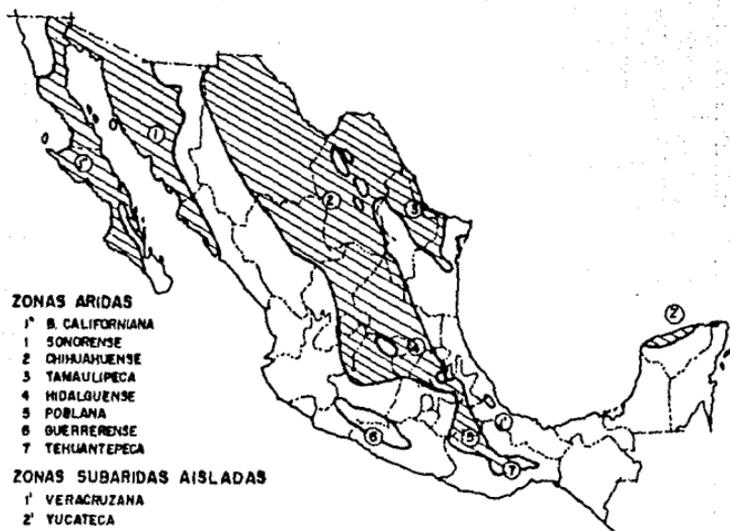


FIGURA 2.15

IRRADIACION SOLAR GLOBAL MEDIA ANUAL EN MEXICO EN KW/h²-DIA*



ZONAS ARIDAS DE MEXICO

FIGURA 2,16

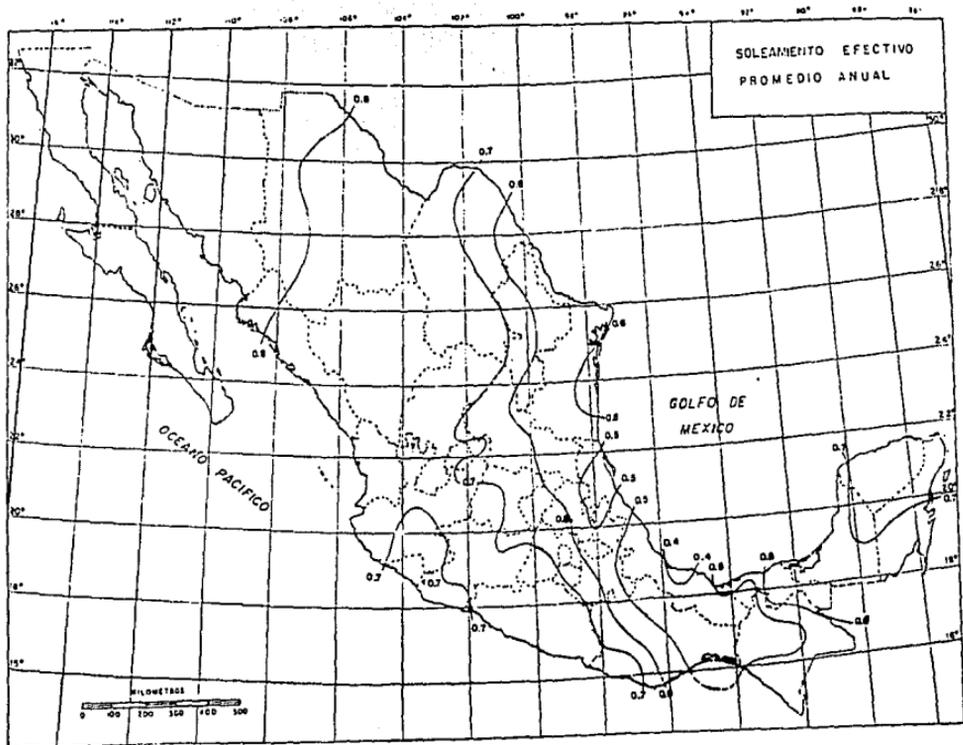


FIGURA 2.17

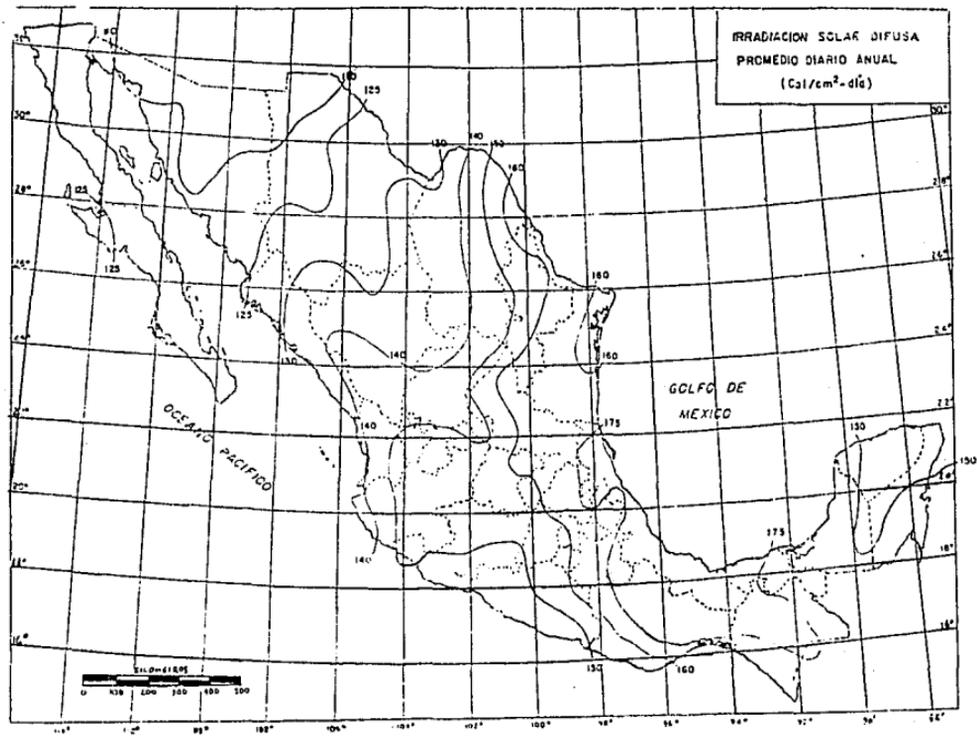


FIGURA 2.18

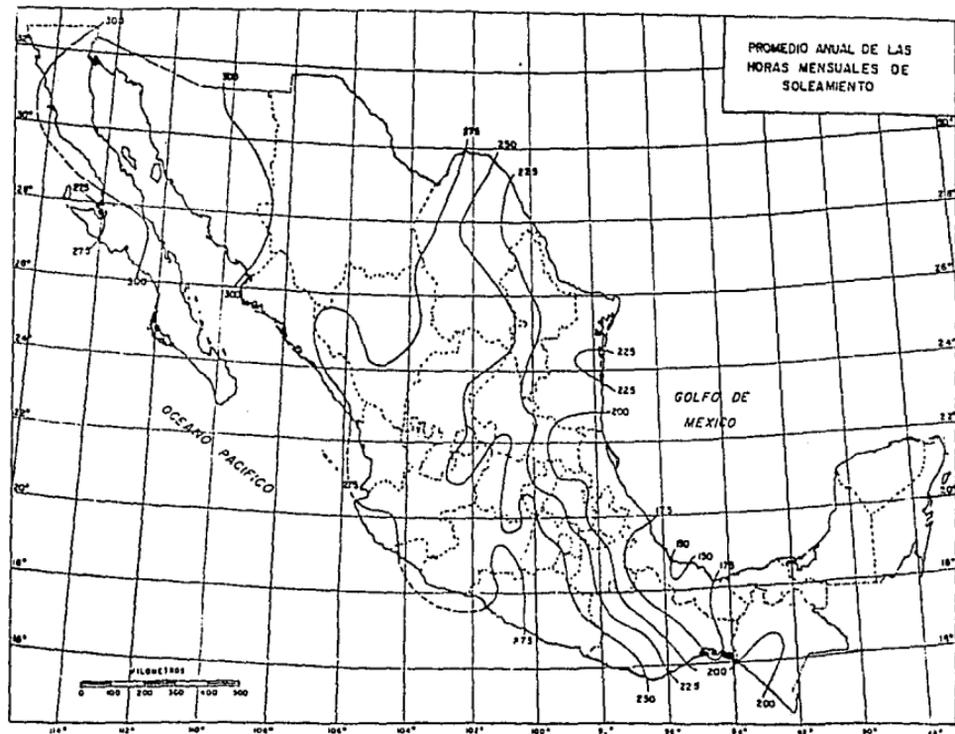


FIGURA 2.19

3 OBRAS DE TOMA

3.1. GENERALIDADES

La función de las obras de toma para el caso que nos ocupa, es captar el agua de mar a procesar para luego entregarla en condiciones de gasto y presión requeridas por el siguiente subsistema, que será usualmente el de pretratamiento.

Una buena instalación de los equipos y obras accesorias que conforman lo que llamamos en desalación "tomas de agua", reditúa en una buena operación y larga vida útil del equipo, que es el trabajo más árduo con que se cuenta al operar una planta desaladora.

Las condiciones que debe reunir una toma de agua son:

1. Deberá proporcionar el volumen de agua necesario para desalar, de acuerdo al tipo de planta que se va a instalar y a la capacidad nominal del equipo.
2. La forma de captar el agua deberá ser sencilla y económica.

3. Deberá ser la más idónea para el lugar elegido, tomando en consideración: zona, profundidad, épocas del año, mareas, formaciones del suelo, etc.
4. Deberá tener fácil acceso, área de maniobras, desasolve, protección e iluminación.
5. Las instalaciones de operación y mantenimiento del equipo de desalación deberán estar cercanos a la fuente, y;
6. Deberá poseer boyas, las cuales tienen la finalidad de señalar la dirección en que se encuentra tendida la línea de succión (figura 3.1).
7. Se deberá mantener la línea de succión en una posición fija por medio de anclajes que pueden ser muertos de concreto, acero estructural o simplemente sacos de arena o bolsacreto dispuestos a distancias no mayores de 3 m, de manera que se contrarresten las corrientes que pudiesen romper el tubo.

En caso de que se utilice estructura de acero, ésta deberá estar protegida con recubrimiento epóxico antioxidante. El amarre de la tubería se hará utilizando nylon o seda que impida la corrosión.

Aceptando las bases establecidas para una buena "toma de agua", a continuación estudiaremos los principales tipos de tomas existentes y algunos de los problemas que podrían presentarse en su instalación. Aunque no son todas sus variantes si son, al menos, las más comúnmente conocidas. Para tal efecto se hará una clasificación muy simple en lo que se refiere a la forma de tomar el agua de la fuente:

a) Métodos de toma directa

b) Métodos de toma indirecta

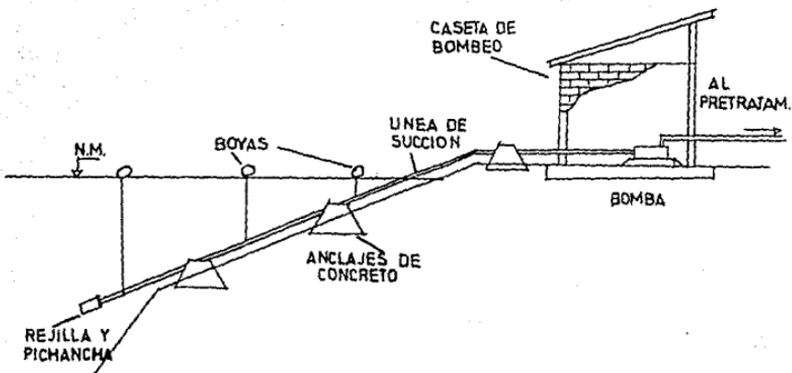


Figura 3.1. Se emplean boyas para marcar la dirección que mantiene la tubería de succión.

3.2. METODOS DE TOMA DIRECTA

Consisten, como su nombre lo indica, en tomar el agua directamente por medio de una tubería de succión sumergida en el mar, la cuál, con objeto de proteger su entrada de las obstrucciones causadas por partículas de tamaño grande, se le coloca una rejilla cilíndrica de acero inoxidable o aleación de cobre.

Presentan la ventaja de que generalmente proporcionan agua de salinidad preestablecida y constante (salvo en el caso de esteros o zonas de alta evaporación y baja recarga). Sin embargo, en la Península de Baja California, en el litoral del Pacífico, presentan una serie de dificultades que han significado graves obstáculos para la buena operación de los sistemas. Algunos de los problemas que se han presentado son los siguientes: conformación del fondo marino y a

la gran variación de las mareas, consecuentemente, no puede disponerse de agua en forma constante en puntos cercanos a la playa, lo que obliga a un avance mar adentro de la obra de captación.

Otra dificultad se origina por la naturaleza del lecho oceánico, que es arenoso en su totalidad, lo que ocasiona la presencia de grandes cantidades de arena en suspensión, misma que es tomada por los equipos de bombeo, ocasionandoles un desgaste adicional. Este problema ha sido resuelto mediante el empleo de sedimentadores y equipos de bombeo resistentes a la abrasión.

La presencia de material orgánico en suspensión (algas y peces de diferentes tamaños) es otra dificultad que se encuentra en este tipo de tomas, y que puede ser resuelta mediante el empleo de filtros instalados antes de los equipos de bombeo. Además, entre el material orgánico en suspensión, se encuentran los huevecillos, larvas de peces y moluscos, los que pueden pasar a través de los filtros, adhiriéndose y creciendo en las líneas de conducción, obstruyéndolas. Este problema se combate mediante el uso de cloro o calentamiento del agua, cuando la naturaleza del equipo lo permita.

Otro problema al que pueden enfrentarse éste tipo de tomas es la contaminación originada por el hombre, ya sea por la descarga de los desperdicios industriales o domésticos en puntos cercanos a la toma, o por la construcción de obras que alteren la trayectoria de las corrientes, creando el problema de acarreo, azolvamientos o turbulencias.

Aún tomando como medida de protección el uso de la pichancho, que evita que se vacíe la tubería de succión, puede taparse con la basura arrastrada por el mar, y debido a esto es recomendable conectar un compresor para alimentar con aire a estos elementos y expulsar de esta manera las basuras causantes de la obturación como se muestra en las figuras 3.2, 3.3 y 3.4. La tubería empleada normalmente en este tipo de tomas puede ser de PVC o asbesto-cemento y debe estar anclada al suelo para evitar movimientos perjudiciales por la marea, así como al equipo de bombeo. Las bombas son de tipo centrífugo con impulsor y carcasa construidos en bronce para soportar la acción corrosiva del agua de mar.

3.2.1 CANAL DE CAPTACION

En la actualidad existen otros métodos para alimentar de agua a las plantas desaladoras, entre ellos se encuentran los canales recolectores, los cuales tienen tres rejillas para retención de sólidos, que pueden ser removidas para su limpieza de una en una,

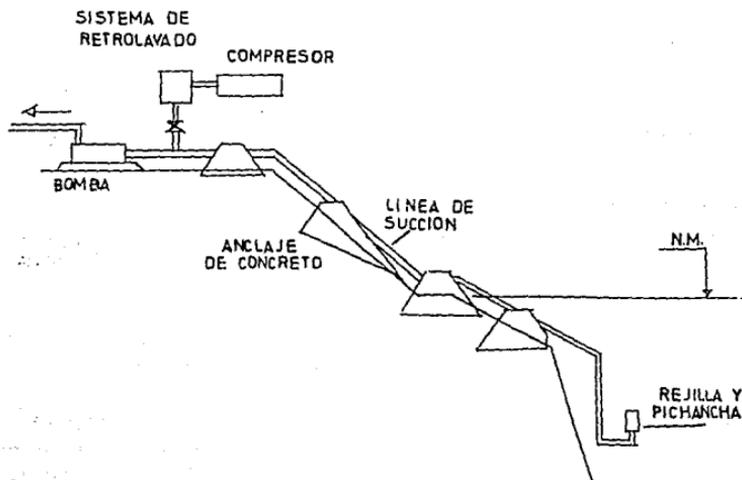


Figura 3.2. Obra de toma directa con succión ascendente.

dejando dos en servicio para no interrumpir la operación.

Este tipo de captación de agua de mar se utiliza generalmente para suministrar agua a equipos de desalación de grandes capacidades, ya que la infraestructura que significa un canal de este tipo es grande en virtud de que se efectúa algunas veces en terreno rocoso con los problemas y riesgos que representa el dinamitado del mismo, como son la construcción de rompeolas que soporten el embate del mar y la caseta de albergue de los equipos de bombeo.

Tomas de agua de este tipo, disminuyen considerablemente los

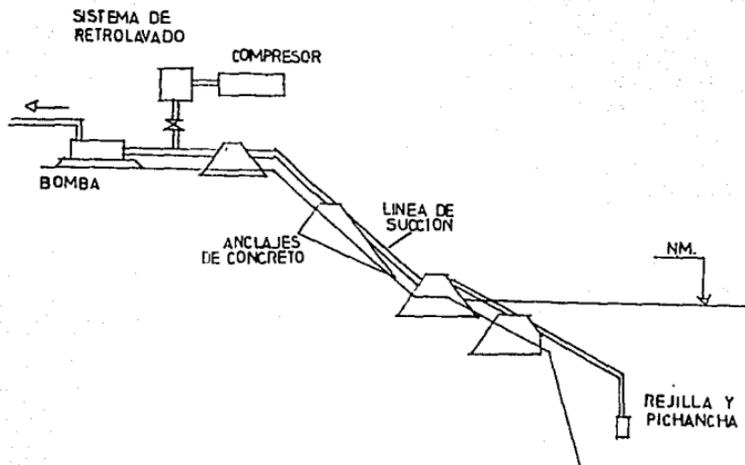


Figura 3.3. Obra de toma directa con succión descendente.

problemas de operación y mantenimiento siempre y cuando se realicen y se orienten de una manera adecuada, programándose de tal manera que el canal de captación sea llenado por el principio de vasos comunicantes.

Los problemas a los que se enfrenta este tipo de tomas de agua de mar es la dificultad para eliminar materiales en suspensión como son el sargazo, lechugilla, etc., los cuales, al ser succionados, obstruirían tuberías de conducción y las charolas del evaporador cuando se utiliza destilación solar para la desalación.

Las dimensiones del canal varían según las condiciones del lugar y del volumen horario de captación lo mismo que del flujo del agua, el cual, será determinado por las gráficas de mareas para ese lugar o uno similar, editadas por el Instituto de Oceanografía, ya que deberá tener un azolve natural.

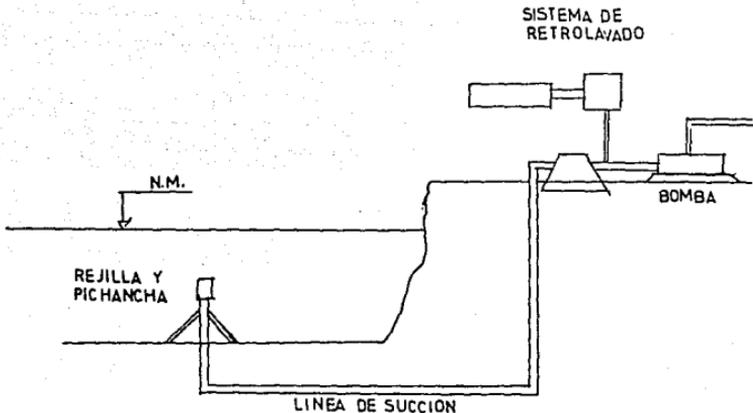


Figura 3.4. Obra de toma con succión descendente con tubería subterránea.

3.2.2. LINEA SUBMARINA ANCLADA

Cuando las condiciones marinas en la zona de captación son favorables, se procede entonces a la instalación de una línea submarina que irá anclada al fondo mediante muertos de concreto, estructuras de acero o bien por simples sacos de arena (ver figura 4.1.) a distancias no mayores de 3 m como medida de seguridad para el tubo. En el caso de que se utilice como anclaje una estructura de acero, ésta deberá estar protegida con recubrimiento epóxico que prolongue su vida útil, y el amarre de la tubería se hará utilizando nylon o seda que impida la corrosión y la erosión. Este tipo de captación, además de sencilla y barata, funciona en muchos casos siempre y cuando se tomen algunas precauciones, que si no eliminan del todo los problemas, los disminuyen en alto grado.

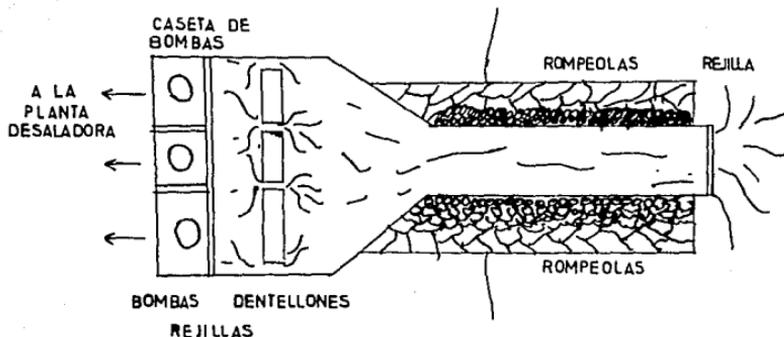


Figura 3.5. Toma de agua directa mediante el uso de un canal.

El cálculo de una tubería de este tipo requiere varias consideraciones. En primer lugar, la tubería requerida dependerá de la obtención del diámetro óptimo de succión de la bomba. El material podrá ser PVC, fibra de vidrio o asbesto-cemento según como sean las condiciones marinas. Estará tendida en la misma dirección de la marea, de tal forma que la ola rompa siempre a lo largo de la tubería y nunca a los costados ya que esto provocaría una tensión desigual a lo largo de la misma.

La tubería tendida bajo el mar deberá cumplir con algunas características:

- a) Estar levantada un mínimo de 40 cm del fondo.
- b) La bomba será preferiblemente centrífuga horizontal.
- c) No deberá tener succión directamente al fondo marino.

Finalmente, un juego de válvulas y accesorios permitirán el cebado del equipo y el retrolavado de la tubería. La línea submarina deberá tener los señalamientos adecuados que favorezcan su mantenimiento sobre todo cuando la succión está bastante retirada de la playa, ya que en la mayoría de los casos ésta línea queda cubierta por arena y es difícil su localización. Este tipo de toma no es recomendable cuando el terreno es rocoso o bien cuando hay presencia de corales, ya que se corre el riesgo de que alguno de los anclajes se suelte y pueda dañarse la tubería al contacto con la roca.

3.2.3. TOMA DE AGUA CON PROTECCION DE FLORA Y FAUNA

En las ocasiones en que se toma el agua de lagunas artificiales para hoteles o bien para estanques de criaderos marinos, es muy necesario proteger a la fauna, sobre todo en forma de larvas contra la succión de los equipos. Es entonces cuando se realiza una toma de forma horizontal pero terminada en un cilindro formado por anillos concéntricos con inclinación piramidal interior calculada de antemano, que permite el paso del agua, pero que impide el paso de partículas muy pequeñas debido a su forma de diseño.

Los materiales empleados para este equipo cilíndrico es el acero inoxidable por su baja corrosión y aún cuando los costos son altos se justifica plenamente en estos casos por el alto costo del equipo y por que reduce el costo de mantenimiento.

Los anillos empleados en este diseño especial, deberán ser calculados tomando en consideración el tipo y tamaño de larvas que se van a proteger, la velocidad de la corriente y el volumen de agua de extracción.

Tomas de agua de esta naturaleza son poco frecuentes en nuestro país por su alto costo y diseño especial, sin embargo han sido probadas con alta eficiencia en muchas partes del mundo.

3.2.4. TOMAS CON ELIMINACION DE ARENA

Cuando la arena se encuentra en suspensión y además siendo su granulometría sumamente pequeña, se recomienda la instalación de desarenadores que pueden ser centrifugos o bien, tanques de sedimentación.

Los tanques de sedimentación, aunque menos costosos, en ocasiones

no dan el resultado esperado por la alta turbiedad del agua empleada, por lo que los desarenadores centrifugos son usados con mayor frecuencia.

El desarenador centrifugo consta de un recipiente cónico el cual posee una entrada inferior por donde pasa el agua; la arena, por diferencia de densidades, se precipita al fondo de donde será expelida por retrolavados periódicos, por lo que la succión de los equipos de bombeo serán colocadas en la parte céntrica del cono. En algunos casos el llenado de éstos conos y el cebado de los equipos de bombeo se hace mediante succión de vacío, utilizando diferencias de presión. Los tanques de sedimentación generalmente se construyen de forma duplex con una pared intermedia con descarga de agua en uno y llenado el otro por el principio de vasos comunicantes. La arena sedimentada en el primero es eliminada por purgas continuas y la succión del equipo de bombeo se instalará en el tanque contrario a la descarga y a una altura siempre mayor de 30 cm. del fondo.

Estos tanques son diseñados de acuerdo al área, para obtener una velocidad de sedimentación adecuada, y un volumen de extracción de agua suficiente para alimentar el proceso.

3.3. METODOS DE TOMA INDIRECTA

Consiste en una tubería de asbesto-cemento, la cual descarga a un cárcamo en donde una bomba succiona el agua para alimentar a la planta desaladora como se muestra en las figura 3.6.

Otra variante consiste en la construcción de un pozo o cárcamo comunicado al mar mediante un canal en el cual solamente se instala una reja en la entrada del canal de alimentación para detener el paso de objetos grandes. En el cárcamo se halla sumergida la pichanCHA a una altura inferior al nivel de bajamar.

3.3.1. TOMA DE POZO PROFUNDO

Este tipo de captación puede resultar una buena alternativa, ya que reúne las características de limpieza, cercanía, disponibilidad, facilidad de mantenimiento e independencia de las condiciones climatológicas. Sin embargo, no se ha podido utilizar este sistema con mucha frecuencia, pues se han presentado las siguientes dificultades:

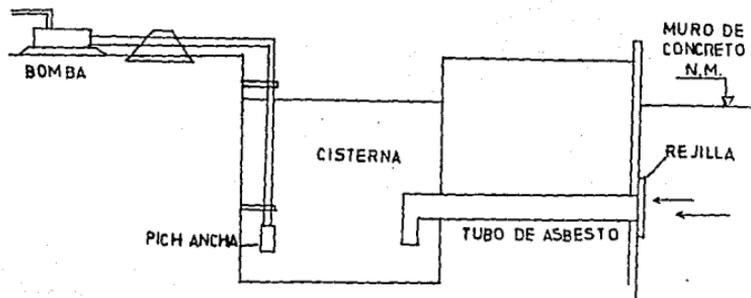


Figura 3.6. Toma indirecta con empleo de tubo y cárcamo para succión.

- a) La naturaleza geológica del terreno, lo hace casi siempre impermeable, impidiendo el flujo de agua de mar en las cantidades requeridas, y en ocasiones, en lo absoluto.
- b) Se han localizado en terrenos de buena infiltración, que además, poseen depósitos de aguas fósiles con salinidad superior a la del agua de mar.
- c) En algunos casos el agua encontrada, aunque de salinidad aceptable, presenta concentraciones anormales de algunos compuestos (H_2S , Ba^{++} , S^{2-}), originando la imposibilidad de su empleo.

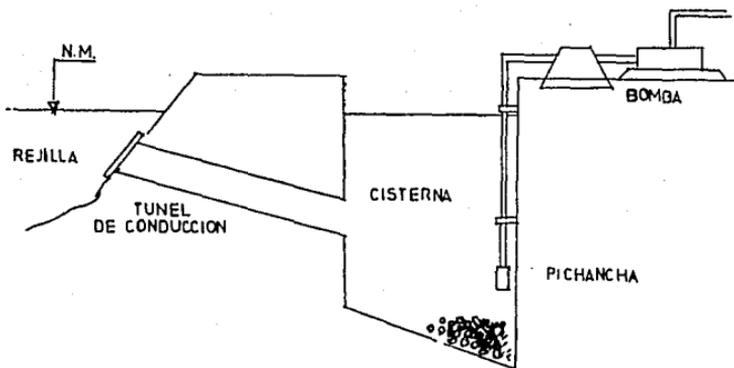


Figura 3.7. Toma indirecta empleando canal, rejilla y foso para material azolvado.

- d) Se ha tenido aumento considerable de la salinidad con el transcurso del tiempo, hasta convertir el agua en inaceptable.
- e) En algunos casos se ha observado una relación directa entre el nivel de mareas y el nivel del agua del pozo, que llega a descender considerablemente hasta llegar al punto de agotarse en algunas ocasiones, teniendo irregularidad en la disposición del agua.

Cuando se hace una toma de pozo profundo deberá tomarse en cuenta que el ademe del pozo tenga el diámetro necesario para la instalación de la tubería de succión. Una vez ademado se deberá instalar la tubería de succión hasta por lo menos un metro debajo del nivel de bajamar, ya que si no hacerlo podría provocar que se descebara la

bomba, o bien que se tenga que retornar parte del agua de la descarga de la misma, ocasionando su enturbiamiento, obturación del equipo y azolve en la descarga.

Durante la instalación y el mantenimiento de los equipos para pozos profundos se debe tener siempre la precaución de contar con el equipo adecuado, ya que improvisar ha dado como resultado, en algunas ocasiones, que parte de la columna, o bien los impulsores con sus tazones (en el caso de usar bomba de tubería vertical), se caigan obstruyendo el ademe y tapando el pozo.

Generalmente este "tipo de toma" se emplea para captar agua cuando se van a utilizar plantas desaladoras por el proceso de ósmosis inversa, siendo la única forma de utilizar la succión en el fondo para no romper la interfase salina; después de haber detectado la conductividad a diferentes profundidades mediante conductímetros de sondeo se procede a la instalación de ventanas en el ademe previamente cerrado en el extremo y a la profundidad requerida.

3.3.2. CAPTACION POR POZO MARINO

En algunas ocasiones en que por necesidades del lugar se instalan equipos donde se tienen playas extensas (generalmente lugares turísticos), y por lo mismo, el agua es poco profunda a grandes distancias de la playa, y sobre todo cuando se retira en bajamar disminuyendo también su profundidad, se utiliza la toma de agua de mar que denominamos "captación por pozo marino".

Esta captación consiste en la excavación de un pozo cuya profundidad será la necesaria para tener el volumen requerido por el equipo de desalación y variará de acuerdo a las características propias del suelo, tales como suelo arenoso, calcáreo o rocoso y si posee o no permeabilidad lateral además de la intrusión salina.

Las variantes en este tipo de instalaciones son múltiples y dependen de varias circunstancias. Si el mar se aleja demasiado en bajamar, lógico es que el nivel del pozo disminuya considerablemente dejando en ocasiones la succión al descubierto. Esto se puede evitar profundizando el pozo, con los consiguientes problemas de achicamiento y excavación, o teniendo una línea de alimentación de agua desde una profundidad mínima de un metro de acuerdo a la gráfica de mareas.

En algunas ocasiones la marea sube de tal manera que deposita en

el pozo todo tipo de sedimento, por lo que es menester hubicar el brocal del pozo, por lo menos 2 metros arriba del nivel más alto registrado para el fondo del ademe.

En otras ocasiones, y de forma muy rústica pero obteniendo resultados muy similares, se hace un muro de contención a base de sacos rellenos de arena seca o bolsacreto, la cual fragua rápidamente impidiendo el paso de todo material en suspensión que lleve el agua actuando como rompeolas cuando las condiciones climatológicas son críticas.

En el caso de pozo marino, pozo profundo y con excepción de condiciones anormales, la captación del agua se hace sin grandes problemas, sin embargo, en virtud de lo poco profundo de estos pozos, no se recomienda la succión directamente al fondo, sino una succión horizontal con perforaciones laterales y por encima del mismo.

3.3.3. TOMA DE AGUA UTILIZANDO INSTALACIONES MARINAS

Generalmente se instalan plantas desaladoras en apoyo a obras pesqueras o de desarrollo turístico, contándose con algunos tipos de instalaciones que pueden ser aprovechadas al máximo mediante ciertas modificaciones que nos proporcionan seguridad, acceso y confiabilidad a los equipos.

En el caso de que exista algún muelle para embarcaciones de poco calado, se recomienda utilizarlos, instalando las tomas de agua mar adentro del muelle por ser de mayor profundidad y porque permite la sujeción de la tubería en forma segura.

Se recomienda en estos casos instalar una succión horizontal con taponamiento en su extremo y con perforaciones laterales y superiores en la línea de succión. El diámetro y la longitud del tubo horizontal, lo mismo que el número y diámetro de las perforaciones, estará dado por el volumen de agua requerido en la planta que se desea instalar.

Como ya se comentó anteriormente, la flora, organismos y objetos indeseables en nuestra tubería, solamente los podemos controlar; por ello es necesario calcular un exceso por taponamiento en orificios y deberán recubrirse con malla del No. 30 para evitar los materiales en suspensión.

El taponamiento será detectado al bajar la eficiencia de la bomba, momento en el que se deberá efectuar un retrolavado utilizando

un equipo de bombeo auxiliar. Cuando se realiza la operación de retrolavado, el agua tenderá a salir por los orificios de succión, con lo que se desprenderá todo el material sedimentado en las perforaciones. No obstante que el retrolavado es una operación importante y de relativamente fácil ejecución, no se debe perder de vista el aspecto relativo al cebado de las bombas empleadas, el cual se realiza mediante un equipo auxiliar de bombeo y utilizando una válvula de mariposa, la cual en el momento de arranque, es operada manualmente.

Generalmente este tipo de tomas es necesario instalarlas por duplicado, siendo una auxiliar de la otra y teniendo siempre una como reserva para mantenimiento o bien para el retrolavado, pero como el efecto más importante al que estará sometida nuestra tubería es el del oleaje, la tubería requerirá protección mediante otros muertos de concreto que la resguarden del fenómeno antes mencionado, así como de materiales grandes en flotación que pudiesen golpearla.

Por todo lo anterior, es necesario considerar dentro de cualquier proyecto de planta desaladora el tipo de toma más recomendable, tomando siempre en cuenta que todo equipo de desalación necesita un estricto control, tanto en la instalación como en la operación para cumplir con ciertas normas de calidad del agua de alimentación.

Podemos afirmar con toda seguridad que la captación de agua para plantas desaladoras no tienen mayores problemas que los ya enumerados por lo que, después de captar el agua y antes de procesarla, hay que determinar su calidad mediante análisis de laboratorio para poder elegir el pretratamiento más adecuado, como se indicará en el capítulo 4.

4. BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESALACIÓN

4.1. GENERALIDADES

Las más importantes tecnologías usadas para la desalación en la actualidad son destilación (varios tipos de procesos de evaporación), Osmosis Inversa (OI), Electrodialisis (ED), Electrodialisis inversa (EI) y desmineralización por intercambio iónico. En los Estados Unidos de Norte América, los procesos de membrana (OI, E y EI) se espera que continúen siendo los procesos de destilación de mas uso.

Los rangos de concentración típica de sólidos totales disueltos (STD) en el agua de alimentación para destilación, OI, E, EI y desmineralización con intercambio iónico se muestran en la Figura 4.1.

El proceso de membrana OI se usa para aguas de alimentación típicas con STD de 35,000 a 45,000 mg/l (concentraciones del agua de mar) los procesos de membrana E y EI se usan para concentraciones típicas de STD de hasta aproximadamente 10,000 mg/l. La destilación y otros procesos térmicos (sin membrana) se usan principalmente para conversión de agua de mar y aplicaciones industriales.

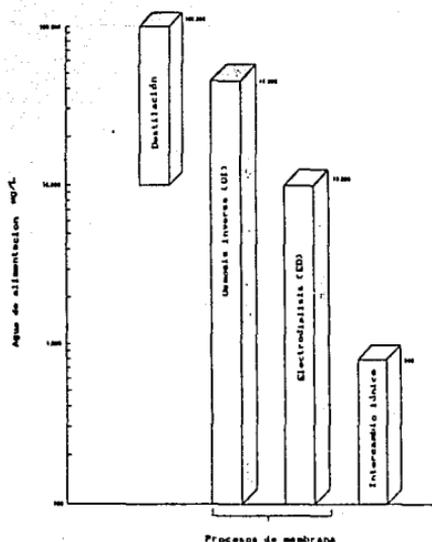


Figura 4.1. Concentraciones típicas de sólidos totales disueltos.

El Intercambio Iónico es un proceso en el cual se usan resinas aniónicas y cationicas para intercambiar iones hidrógeno e hidróxido; es principalmente usado en aplicaciones industriales para las cuales se requiere agua muy pura y el agua de alimentación es relativamente baja en STD.

En 1985 la capacidad mundial instalada de plantas de desalación operando en tierra excediendo 100,000 l/día fue mayor de 11 billones de l/día (mas de 3 veces la capacidad instalada 10 años antes).

Las fuentes de agua de mar y salobre (aproximadamente 1,000 a 10,000 mg de STD/L) se les imputa casi la totalidad de esta capacidad instalada (aproximadamente 75 % el agua de mar y 23 % las fuentes de aguas salobres. Los procesos de membrana representan aproximadamente 30 % de esta capacidad total y casi toda la capacidad de tratamiento de agua salobre.

TABLA 4.1. CONCENTRACION DE LOS PRINCIPALES ELEMENTOS QUIMICOS
 CONTENIDOS EN EL AGUA DE MAR Y SU COMPARACION CON LOS VALORES
 PERMISIBLES EN LA NORMA OFICIAL MEXICANA

ELEMENTO EN EL AGUA	NORMA MEXICANA	CONCENTRACION ppm	PRODUCCION PROBABLE TON/AÑO
Cloruro	0.2 - 1.0	19 361	53 999 107
Sodio	---	10 788	30 010 416
Magnesio	125	1 298	3 617 526
Sulfuros	250	880	2 452 550
Calcio	300	408	1 137 096
Potasio	---	388	1 061 356
Bromuro	---	66	183 942
Carbón	---	28	78 036
Boro	---	6	12 828
Silicón	---	0	11 148
Fluoruros	1.5	1.3	3 623
Nitrógeno	0.1	1.0	2 787
Aluminio	0.2	1.0	2 787
Tritio	---	0.1	279
Fosforo	---	0.07	195
Bario	1.0	0.05	139
Arsenico	0.05	0.02	56
Manganeso	0.15	0.01	28
Zinc	5.00	0.009	25
Selenio	0.05	0.004	11
Uranio	---	0.002	5.6
Cromo	0.05	0.001	2.8
Titanio	---	0.001	2.8
Molibdeno	---	0.0005	1.4
Talio	---	0.0005	1.4
Torio	---	0.0005	1.4
Cadmio	0.005	0.0003	0.8
Lantanido	---	0.0003	0.8
Plata	---	0.0003	0.8
Vanadio	---	0.0003	0.8
Itrio	---	0.0003	0.8
Antimonio	---	0.0002	0.6
Cobalto	---	0.0001	0.3
Mercurio	0.001	0.00003	0.08

4.2. TECNOLOGIAS DE MEMBRANA

4.2.1. OSMOSIS INVERSA

La ósmosis es un proceso natural por el cual un solvente (agua), difunde a través de una membrana semipermeable desde una solución de concentración baja a otra de concentración superior (figura 4.2 A). La membrana fácilmente pasa el solvente pero actúa como una barrera a los solutos (sólidos disueltos). En condiciones de equilibrio, la presión diferencial a través de la membrana es llamada la presión osmótica (figura 4.2 B). En la ósmosis inversa (OI) se aplica una presión mayor que la presión osmótica a la solución concentrada (agua salada) produciéndose un permeado diluido llamado agua producto, (figura 4.2 C).

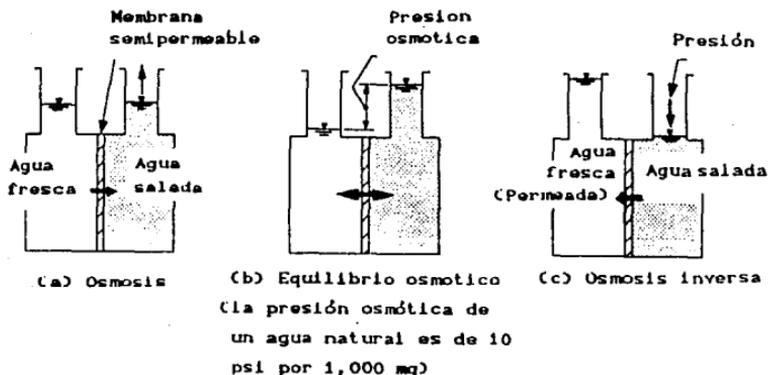


Figura 4.2. Principios básicos de ósmosis, presión osmótica y ósmosis inversa.

La figura 4.3 es un diagrama de flujo de una unidad simplificada de OI. La presión del agua de alimentación, pretratada con objeto de satisfacer ciertas condiciones de calidad establecidas para agua de alimentación de membranas de OI, es aplicada antes de que el agua entre a las mismas. Dos flujos salen de las membranas: el producto (permeado) y el concentrado (rechazo). La fracción de agua de alimentación que resulta como permeado es llamada la recuperación y es usualmente expresada como un porcentaje. La máxima proporción permisible de permeado a rechazo, depende del potencial incrustante del agua, el cual es una función de la calidad del agua de alimentación. Esta proporción se mantiene con el uso de una válvula de control en la tubería de rechazo, forzando así a la tasa de flujo de permeado al valor deseado.

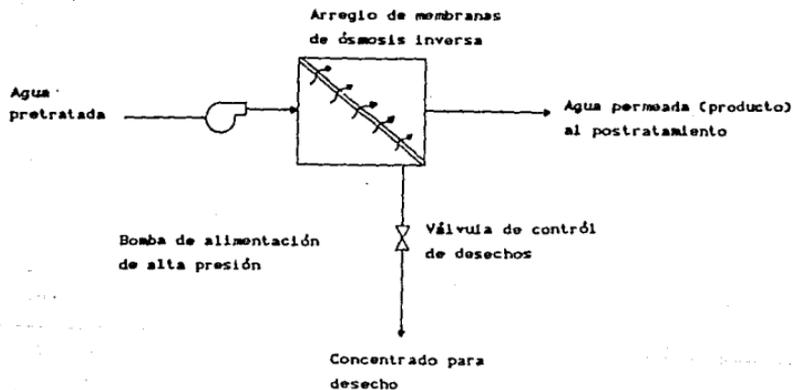


Figura 4.3. Diagrama de flujo de una planta de ósmosis inversa.

Las primeras membranas comercialmente disponibles, desarrolladas a mediados de los 60's, fueron hechas de acetato de celulosa (AC) fabricadas como hojas planas. Las membranas modernas de AC, llamadas celulósicas, son modificaciones de la estructura de AC incluyendo combinaciones y diferentes tratamientos de la superficie. Las membranas no celulósicas incluyen las membranas de poliamida con estructuras de soporte de poliamida asimétrica relativamente gruesa y membranas compuestas con película delgada de poliamida o membranas de otros materiales sobre una estructura porosa de soporte.

El uso de uno u otro material tiene sus ventajas y desventajas. Las membranas basadas en AC no son generalmente las menos costosas por litro de capacidad instalada (primer costo). La diferencia de precio entre AC y compuestas, sin embargo, es decreciente conforme los fabricantes incrementan el suministro de membranas de tipo compuesto y con los nuevos desarrollos en el proceso de fabricación. El uso de las membranas AC requiere generalmente agua de alimentación clorada y una presión de operación más alta que la requerida por las membranas compuestas. Las membranas compuestas generalmente operan con rangos de pH más amplios que las membranas de AC. En algunos casos estas características de operación redundan en ahorros de energía eléctrica y costos de productos químicos. Su mayor tolerancia al pH proporciona ventajas adicionales en limpieza para algunas aplicaciones.

La sensibilidad al cloro y a otros oxidantes fuertes en el agua de alimentación es una desventaja de las membranas de poliamida. Nuevos desarrollos en la investigación de membranas para producir membranas de composición tolerante al cloro han superado esta limitación.

Las membranas de OI están colocadas dentro de contenedores de presión de diferentes configuraciones: fibra hueca, arrollamiento espiral, tubular de plato y marco. En los pasados 20 años, las configuraciones de fibra hueca y arrollamiento en espiral (figuras 4.4 y 4.5) han transformado los estándares de la industria para tratamiento del agua con OI.

Además, aún cuando muchas instalaciones de OI en muchos países usan membranas de fibra hueca la mayor parte de los sistemas de OI construidos en los últimos 5 años han incorporado membranas en arrollamiento espiral. Esta predominancia es el resultado de los

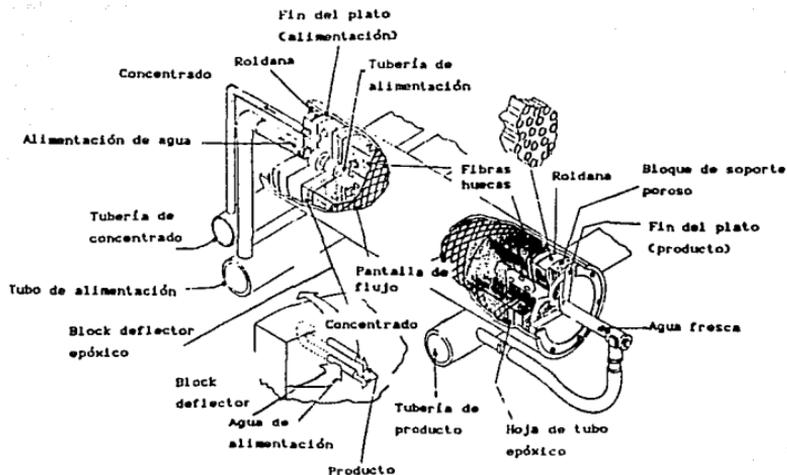


Figura 4.4. Membrana típica para ósmosis inversa del tipo fibra hueca.

recientes avances en la tecnología de membranas que han hecho más fácil adaptar las membranas comerciales de hojas planas en el arrollamiento espiral que en la configuración de fibra hueca.

Dependiendo de la capacidad deseada en un sistema de OI se usan uno o más contenedores de presión con membranas en su interior, formando un bloque modular.

Los contenedores de presión con bloques de OI en su interior pueden ser dispuestos en serie, paralelo o ambos, dependiendo de los requerimientos de diseño. Frecuente esta disposición de contenedores de membranas de OI es llamado un "arreglo de membranas" o un "arreglo de contenedores de presión". Por ejemplo, un arreglo de contenedores de presión 2:1, indican un sistema de dos etapas con dos contenedores de presión en la primera etapa y un contenedor en la segunda etapa. En un arreglo etapa-rechazo, las membranas en el contenedor de la segunda

El flujo del agua producto a través del material poroso en una trayectoria espiral y el flujo a través de los agujeros en los tubos de agua producto

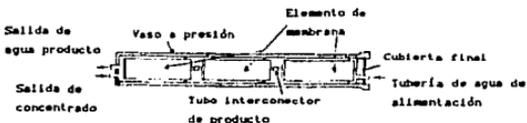
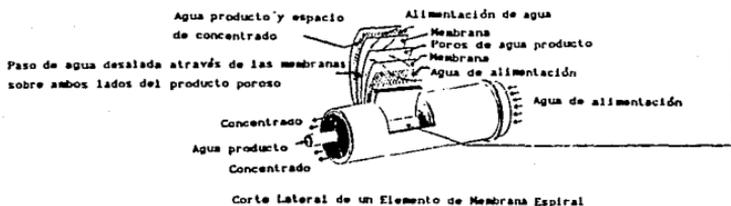
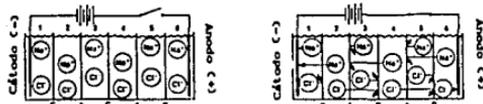


Figura 4.5. Corte seccional de un elemento de membrana, así como la forma de instalarse entre ellas.

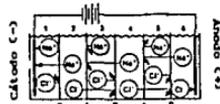
etapa tratarán el agua de desecho concentrado (rechazo) de la primera etapa, recuperando así más agua producto del suministro de alimentación.

4.2.2. ELECTRODIALISIS Y ELECTRODIALISIS INVERSA

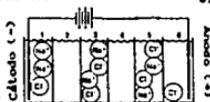
La electrodialisis es un proceso que por medio de la electricidad induce una migración de iones a través de la membrana, removiendo así las sales en solución del volumen de agua de alimentación. El proceso utiliza, membranas de transferencia de cationes (+) y de aniones (-), alternadamente colocadas, empleando corriente directa (figura 4.6 A). Una corriente que pasó a través del arreglo de membranas transfiere iones selectivamente a través de ellas, por medio de intercambio eléctrico de iones Catiión o anión, figura 4.6 B). Los iones son sales disueltas en el agua, cada una conteniendo cargas eléctricas positivas o negativas.



(a) Membranas de transferencia alterna de cationes (C) y membranas de transferencia aniónica (A)



(b) Movimiento de iones durante el flujo de electrones



Adapted from Electrodesiccation
Electrodialysis Manual,
Ionics Inc.,
Worcester, Mass (1964)

(c) Compartimentos de resultado diluido (2,4), concentrado (3,5) y electrodo (1,6)

Figura 4.6. Explicación simplificada del proceso de electrodiálisis.

Los compartimentos alternados entre membranas, quedan agotados o concentrados en sales o iones (Figura 4.6 C). Los pares de celdas se colocan uno sobre otro, es decir apilados, y la reducción de salinidad deseada puede obtenerse mediante el paso de la corriente diluida a través de un apropiado número de pares de celdas y etapas. En la figura 4.7 se muestra un arreglo típico de membranas de electrodiálisis.

El proceso de electrodiálisis inversa está basado en el proceso clásico de electrodiálisis en el que el agua fluye entre membranas de transferencia catiónicas y aniónicas, colocadas alternadamente, a baja presión hidráulica. Los dos procesos difieren en la aplicación de la teoría al diseño del equipo y operación. En electrodiálisis, el flujo de corriente eléctrica está siempre en la misma dirección y las celdas de diluido y concentrado permanecen fijas. En electrodiálisis inversa

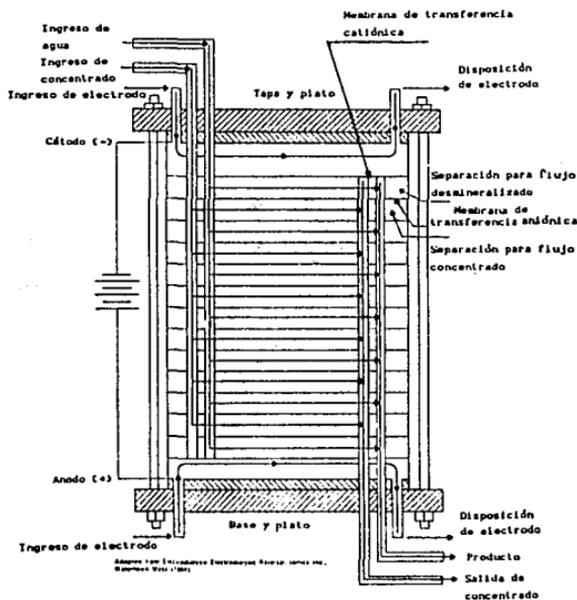


Figura 4.7. Pila típica de membranas de electrodiálisis.

la polaridad eléctrica es invertida periódicamente (comúnmente 2 o 3 veces por hora). Esto provoca un movimiento en sentido contrario de los iones y provoca flujo eléctrico de iones formadores de incrustaciones desde las superficies de las membranas. Este flujo eléctrico puede controlar la incrustación y obstrucción de las membranas reduciendo las necesidades de pretratamiento. Las unidades de electrodiálisis inversa pueden ser capaces de operar a más altos niveles de sobresaturación de sales solubles, que el proceso de electrodiálisis, dando así el proceso de electrodiálisis inversa un rango más amplio de aplicación.

4.2.3. CONSIDERACIONES DEL SISTEMA

En la figura 4.8 se muestra el diagrama de flujo de un sistema de membrana típico de desalación con tratamiento dividido. Casi todos los sistemas incluyen procesos de pretratamiento y postratamiento además de la unidad de desalación. La extensión del pretratamiento y del postratamiento depende de los requerimientos de aplicación específicos. Además en muchos casos el sistema de desalación puede diseñarse con un arreglo de tratamiento dividido. En este caso una fracción del agua de alimentación se desvía de la unidad de desalación y es mezclada después con el producto desalado. 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.

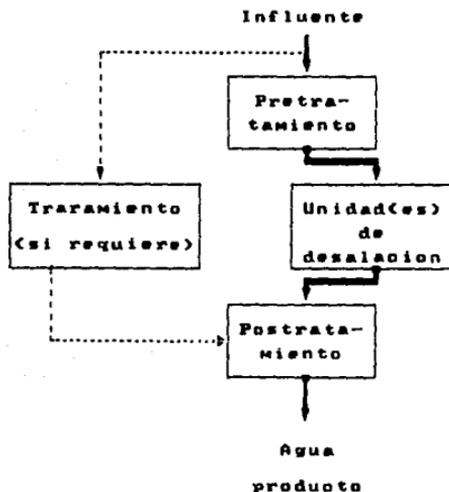


Figura 4.8. Diagrama de flujo de un sistema de desalación típico con tratamiento dividido.

4.2.3.1. Pretratamiento

Usualmente se requiere pretratamiento para proteger al sistema de membranas, mejorar su funcionamiento, o para ambos fines. El tipo de pretratamiento requerido depende de las características del agua de alimentación, tipo de membranas y parámetros de diseño del sistema. Los requerimientos de pretratamiento pueden ser mínimos, como es el caso de los cartuchos de filtración para agua de pozo; o más elaborados, como la coagulación, sedimentación y filtración de un agua superficial.

Para sistemas de ósmosis inversa, el pretratamiento estándar consiste en añadir reactivos químicos para el control de incrustaciones, seguido de filtros de cartucho (usualmente 1, 5, 10, o 20 μm de medida nominal), para protección de las membranas.

Frecuentemente el agua de alimentación es acidificada para disminuir su pH; este paso casi siempre es requerido para membranas celulósicas; también se agregan inhibidores de incrustaciones tales como el hexametáfosfato de sodio o reactivos químicos apropiados para reducir la incrustación potencial de carbonatos y sulfatos.

El pretratamiento estándar para sistemas de electrodiálisis incluye el paso del agua de alimentación a través de filtros de cartucho (10 o 20 μm), y adición de reactivos químicos, aunque el punto de adición química puede ser en la corriente reciclada del concentrado. La mayor parte de los sistemas estándar de electrodiálisis inversa alimentan solamente ácido a la corriente concentrada del reciclado en forma intermitente durante la rutina de limpieza.

4.2.3.2. Sistema de bombeo

El sistema de bombeo eleva la presión del agua de alimentación pretratada al nivel requerido para 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 totales disueltos bajos y salmueras; en el caso de agua de mar se aplica una presión de 800 a 1,200 psi. El sistema de bombeo para ósmosis inversa podría también incluir dispositivos de recuperación de energía, particularmente para sistemas de agua de mar. Los procesos de electrodiálisis y electrodiálisis requieren un bombeo de baja presión

para incrementar la presión del sistema a 70 o 90 psi y permitir una distribución de flujo apropiada a través de los canales de flujo de las membranas.

4.2.3.3. Unidad de desalación

La unidad de desalación contiene el juego de membranas para los procesos de ósmosis inversa (OI), electrodiálisis (E) y electrodiálisis inversa (EI). Los sistemas de OI y EI pueden ser construidos de forma modular. Los grandes sistemas se componen de varias unidades paralelas idénticas que reciben el agua de alimentación pretratada de un origen común, junto con el agua de desecho concentrado y postratamiento común. La disponibilidad de unidades modulares es una ventaja debido a que permite una construcción por etapas para cumplir con las demandas de crecimiento a un costo mínimo.

Los sistemas de limpieza de membranas normalmente se proporcionan para usarse con OI, E y EI. Usualmente la limpieza periódica es complementada con la circulación de soluciones químicas limpiadoras que pasan a través de las membranas sin removerlas de la unidad.

4.2.3.4. Postratamiento

El postratamiento que debe hacerse para procesos municipales de membrana comúnmente incluye ajuste del pH del agua producto para el control de la corrosión y adición química para la desinfección.

Típicamente, los gases atrapados tales como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno (si está presente) se remueven antes del ajuste final del pH y desinfección.

La desorción de los gases se efectúa normalmente en una corriente forzada a través de una columna empacada. En muchos casos el dióxido de carbono debe removerse para estabilizar el agua producto de OI. En sistemas de E y EI, la remoción del dióxido de carbono usualmente no se requiere porque la adición de ácido, si se usa, normalmente se hace a la corriente de concentrado (reciclo) y no a la corriente de agua de alimentación. Si hay sulfuro de hidrógeno, la desorción del agua producto se proporciona para OI así como también para E y EI con objeto de controlar el olor y minimizar la cantidad de desinfectante (cloro, por ejemplo). En el proceso de OI, el pH final

del agua producto se ajusta con sosa cáustica, cenizas de sosa (soda ash) o cal. Un agua no corrosiva puede producirse utilizando estos reactivos químicos alcalinos y, en algunos casos, otros reactivos mezclándolos con agua cruda u otros suministros que puedan también alimentar la red de distribución.

4.2.4. CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACION

La composición del agua cruda proveniente de la fuente de abastecimiento debe siempre considerarse en el diseño del tratamiento convencional del agua y en el proceso de desalación. Sin embargo el diseño de sistemas de desalación y su operación económica están mucho más relacionados con la composición del agua de alimentación y del producto requerido que con los procesos de tratamiento más convencionales. La composición del agua cruda es probablemente el componente más importante en el diseño de procesos de desalación. Los parámetros típicos de calidad del agua necesarios para el diseño de procesos de sistemas de desalación con membranas se muestran en el cuadro 4.1.

La composición del agua de alimentación determinarán en el diseño la elección de los componentes del sistema de membrana, los cuales se enlistan a continuación:

- Costo del equipo,
- Costo de operación del proceso,
- Máxima recuperación (grado de concentración o porcentaje de agua de alimentación que puede ser convertida en agua peroducto),
- Calidad del producto,
- Posible mezclado del agua producto con agua de alimentación para reducir el costo global del agua producida (tratamiento dividido),
- Tipo y número de membranas requeridas,
- Etapas hidráulicas de ósmosis inversa, electrodialisis y electrodialisis inversa (y etapas eléctricas para electrodialisis y electrodialisis inversa), y
- Disposición del concentrado.

4.2.4.1. Sólidos disueltos

La salinidad del agua de alimentación es un parámetro importante en la aplicación de los procesos de membrana. Por ejemplo, la presión osmótica de una solución se incrementa conforme la concentración de STD del agua de alimentación aumenta. Como una primera aproximación, el gasto de agua producto de OI es proporcional a la diferencia entre la presión aplicada en la alimentación a las membranas menos la presión del producto y la presión osmótica del agua de alimentación.

Conforme la concentración de STD en el agua de alimentación se incrementa, el consumo de potencia eléctrica para E y EI aumenta para obtener una calidad de producto constante. Una diferencia importante entre OI respecto de la E y EI es la economía de cada proceso relativa a la cantidad de sal a ser removida. El costo de operación de la E y EI se relaciona directamente con los STD del agua de alimentación; inversamente, el costo de operación de la OI se relaciona directamente con el gasto de agua producto y presión de operación requerida.

Los costos de ósmosis inversa se relacionan solo secundariamente con la cantidad de sales removidas en los rangos bajos de STD del agua de alimentación.

4.2.4.1. pH

Todas las membranas (OI, E y EI), deben ser operadas dentro de rangos específicos de pH. Muchos tipos de membranas de E, EI, poliamidas y membranas de OI compuestas, pueden tolerar continua exposición al agua de alimentación en un pH de 4 a 10 y exposición intermitente en un rango más amplio. Las membranas celulósicas de OI, por otra parte, normalmente requieren operar entre un pH de 4 y 6.5 para un funcionamiento aceptable.

4.2.4.3. Temperatura

La temperatura del agua afecta significativamente el funcionamiento de los sistemas de membrana. De ahí que los sistemas de, OI, E, y EI deban ser operados dentro de las temperaturas recomendadas por los fabricantes. Para OI, el rango máximo de temperatura permisible es generalmente 30-50° C dependiendo del tipo específico de membranas. Los sistemas de E y EI pueden ser operados

CUADRO 4.1.
PARAMETROS TÍPICOS DE CALIDAD DEL AGUA USADOS EN EL DISEÑO DE
SISTEMAS DE DESALACIÓN CON MEMBRANAS

GRUPO	CONSTITUYENTE O PARAMETRO
Iones	Calcio Magnesio Sodio Potasio Bario Estroncio Hierro (total y disuelto) - Manganeso (total y disuelto) Bicarbonato Carbonato Sulfato Cloruro Fluoruro Nitrato
Otros	Sílice pH Alcalinidad Sulfuro de Hidrógeno Conductividad Temperatura del agua Sólidos suspendidos Sólidos disueltos totales* Turbiedad Índice de densidad de sedimentos Cloro residual (total y libre) Bacterias Grasas y aceites Carbono orgánico total (COT) Color

* Evaporación de STD y STD calculados por suma de iones

con una temperatura alrededor de 45° C . Algunas veces el agua de alimentación del pretratamiento incluye procesos de calentamiento o enfriamiento. El gasto de permeado proveniente de un sistema de OI se incrementa marcadamente con altas temperaturas. Además, para algunos tipos de membranas de OI, la temperatura afecta significativamente la tasa de compactación y la vida de las membranas. Para sistemas de E y EI, las altas temperaturas provocan una mejoría en la remoción de sales mientras otros factores permanecen constantes.

4.2.4.4. Sales poco solubles

Los procesos de OI, E y EI concentran las sales en el agua de alimentación y descargan la salmuera concentrada al desecho. La solubilidad de los constituyentes individuales en el agua, tales como el carbonato de calcio, sulfato de calcio y sílice, debe considerarse en el diseño de ambos procesos para optimizarlo y evitar problemas.

Frecuentemente, los sistemas se diseñan para operar bajo condiciones sobresaturadas en los flujos de concentrado, adicionando un reactivo químico inhibidor de incrustaciones. Muchos sistemas de EI operan en condiciones sobresaturadas sin adición de reactivos químicos debido a su característica de polaridad inversa.

4.2.4.5. Sólidos suspendidos

Todos los sistemas de membranas requieren agua de alimentación que esté relativamente libre de materia suspendida y coloidal. Los dos indicadores más comunes de cargas particuladas en el agua de alimentación a membranas son la turbiedad y el índice de densidad de sedimentos (IDS); éste último es un parámetro adimensional que se calcula para un filtro de 0.45 µm acojinado especial de prueba, como se describe en la norma ASTM D4189. Generalmente, los sistemas de E y EI pueden tolerar más altas cargas coloidales que las membranas en arrollamiento espiral de OI, las cuales son más nobles que las de fibra hueca en términos de acoplamiento a cargas particuladas.

4.2.4.6. Hierro y manganeso

El hierro y manganeso pueden causar problemas en los sistemas de desalación con membranas. El manganeso puede incrustarse en los electrodos de E y EI, y ambos, si se oxidan, forman precipitados que

ensucian los sistemas de OI y E. Si estos metales rebasan los criterios de calidad para agua de alimentación de un sistema de membranas en particular, se requerirá removerlos en el pretratamiento, controlarlos con limpieza periódica de las membranas, o ambas actividades.

4.2.4.7. Crecimiento microbiano

El crecimiento microbiano puede ensuciar los sistemas de desalación con membranas, de ahí que deberán ser controlados. Además, las membranas celulósicas de OI pueden ser degradadas por ciertas bacterias. El control microbiano se lleva a cabo con la alimentación continua de desinfectante y limpieza intermitente.

4.2.4.8. Orgánicos

La materia orgánica puede ensuciar las membranas y requerir, por tanto, medidas correctivas tales como un mejor pretratamiento y limpieza periódica. En algunas aplicaciones de las membranas de OI, uno de los objetivos de los sistemas podría ser remover orgánicos del agua. El grado al cual se acumula material orgánico en las superficies de la membranas antes de ser desalojado en el desecho concentrado determina la necesidad de remoción de orgánicos en el pretratamiento. Aceite, grasas, hidrocarburos y varios solventes orgánicos pueden dañar o ensuciar las membranas de OI, E y EI por lo que no deberán permitirse en el suministro de agua de alimentación.

4.2.5. UTILIZACION FINAL DEL AGUA PRODUCTO

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

4.2.6. DISPOSICION DEL DESECHO CONCENTRADO

Una de las principales consideraciones de diseño y, frecuentemente, una de las partidas de mayor costo, es la disposición del desecho concentrado. La corriente del desecho líquido proveniente de las plantas de membranas es algunas veces descargada directamente en el mar por medio del alcantarillado pluvial ya que no requiere tratamiento, o indirectamente por medio de pozos profundos de inyección en la playa. También puede disponerse en lagunas de evaporación; concentrando las sales en una unidad de evaporación, o si es aceptable, descargar el desecho concentrado en el emisor de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los desechos concentrados algunas veces pueden usarse como agua de riego para aplicaciones, en las cuales, las aguas de suministro tienen bajos sólidos totales disueltos y estén siendo tratadas por ello. En el proceso de diseño debe considerarse el método de disposición y la necesidad de tratamiento antes de descargar el desecho concentrado, y el plan de disposición de éste debe reunir los requisitos regulatorios.

4.2.7. FUENTES POTENCIALES DE AGUA

Aunque algunas localidades tienen carestía de agua de cualquier calidad, la situación más común es una escasez de agua con calidad potable. Los procesos de desalación pueden aumentar la capacidad de los suministros de agua potable al convertir previamente suministros no utilizables en agua potable. Las fuentes potenciales de agua con desalación por membrana incluyen: salmueras de agua subterránea, salmueras de agua superficial, agua dura, agua residual municipal, agua subterránea con elevados nitratos, agua de retorno agrícola y aguas marinas.

4.2.8. APLICACIONES DE LA TECNOLOGIA DE MEMBRANA

Las técnicas de desalación tienen como primer objetivo el de remover sales disueltas que generalmente se pueden remover por procesos convencionales de tratamiento. Las técnicas convencionales son adecuadas para la remoción de turbiedad, dureza, alcalinidad, hierro y manganeso, color, olor, sulfuro de hidrógeno, compuestos

orgánicos y microorganismos. Los procesos de desalación por membrana deben ser empleados cuando la concentración de uno o más constituyentes disueltos en el agua excede los estándares existentes o propuestos para el agua de bebida. Las membranas también deben considerarse en aplicaciones diferentes de la remoción de sólidos disueltos.

Los procesos de ósmosis inversa y ultrafiltración con membrana, están siendo cada vez más frecuentemente evaluados como alternativas a los procesos convencionales de tratamiento.

Algunas de las aplicaciones específicas de los procesos de membrana son:

Reducción de sólidos totales disueltos, ablandamiento, remoción de compuestos orgánicos y trihalometanos, materia inorgánica y remoción de radiaciones contaminantes, así como el reuso de agua residual.

4.3. INTERCAMBIO IONICO POR RESINA

El intercambio iónico por resina fué el primer elemento aplicado para los procesos de desalación en escala industrial quedando en desuso los procesos que emplean calor. El proceso de intercambio iónico por resina fué inicialmente sobreestimado, sin embargo ahora es evaluado correctamente ya que la tecnología tuvo avances a un nivel de solamente agua parcialmente pura, pudiendo obtenerse de una solución relativamente diluida (100 ppm, por ejemplo) con un proceso a escala industrial.

Este proceso, sin embargo, no se clasifica como apropiado para agua de mar (incluyendo salmueras) por que en esta hay una excesiva concentración y es usado únicamente para desalación de agua de mar con menos de 500 ppm. El proceso es frecuentemente utilizado en la producción de agua pura para diluir soluciones producidas por otros procesos de desalación.

El problema del proceso de intercambio iónico por resina es la regeneración de la resina. La regeneración en el caso del proceso de desalación por cama de mezclado puede resolverse por intercambio de resinas catiónicas y aniónicas con el uso de una diferencia de gravedad específica.

Para hacer frente a esta situación, se desarrolló un nuevo método que usa como resina un ácido débil y una base débil para la desalación de agua salada y solamente utiliza agua caliente para la regeneración. El proceso como se dijo, puede ser útil para desalación de agua de hasta 3,000 ppm.

4.3.1. PRINCIPIOS Y METODOS DE DESALACION CON INTERCAMBIO IONICO POR RESINA

Si el agua de mar es tratada con la resina tipo hidrógeno de intercambio con catión y la resina tipo hidroxido de intercambio con anión, la desalación de agua de mar puede ser cubierta por la siguiente fórmula:



Los métodos usados en adelante son la mezcla tipo cama y el tipo cama doble.

Con el mezclado tipo cama, la resina de intercambio catiónico y la resina de intercambio aniónico son mezclados en una columna para desalación y puede ser obtenida agua muy pura. Con el tipo de cama dual, sobre del otro tipo, el agua salada es tratada primeramente con la resina de intercambio catiónico para desalación.



y es también tratada con la resina de intercambio aniónico.



Cuando la pureza del agua desalada no es muy alta, la regeneración con este método es simple y económica. Para aplicaciones en desalación, el tipo de doble cama es generalmente el más empleado. La resina utilizada para regeneración de agua caliente es la anfotérica de intercambio iónico teniendo una acidez y basicidad natural de trabajo, y los principios de desalinización con este método son los mismos que los de mezclado tipo cama.

4.3.2. METODO DE REGENERACION DE RESINA

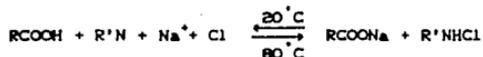
Cuando es fijado el intercambio de volumen de la resina (capacidad), la resina puede ser regenerada antes de ser fijada una cantidad de agua fresca obtenida.

La regeneración de resina en el tipo de doble cama es simple y fácil. Después del tratamiento hasta el último rompimiento de iones la resina de intercambio catiónico puede ser regenerada con el uso de ácido hidroclicórico y la resina de intercambio aniónico puede ser regenerada con el uso de soluciones acuosas de hidróxido de sodio acorde a una regla fijada.

La regeneración de lo mezclado no puede ser operada en las condiciones de mezcla de una cama. Después de suministrar agua de mar dentro de la columna hasta el fondo para separar la resina de alta densidad de intercambio catiónico en la sección baja, y baja densidad de resina de intercambio aniónico en la sección alta; éstas resinas pueden ser regeneradas separadamente.

Estos procesos de regeneración, sin embargo, solamente generan agua de desecho conteniendo ácido y álcali, y presentan un problema de tratamiento de aguas de desecho.

Este es un método para cada una de las resinas, ácido débil y base débil, que es usada para desalinización basada en los principios que se explican a continuación:



En otros trabajos, el agua salada es tratada a 20° C (baja temperatura) para la producción de agua fresca y también tratada con agua caliente a 80° C para regeneración.

4.3.3. PRETRATAMIENTO

Para el pretratamiento, el agua cruda es primero ablandada con la resina de intercambio catiónico tipo Na y después iones carbono hidrógeno (HCO₃⁻) habiendo cambiado el bióxido de carbono (CO₂) con la

adición de ácido, éste es llenado de oxígeno y bióxido de carbono a través de la deaeración con vacío y es también neutralizado. Cuando existe una gran cantidad de suspensión, ésta puede ser removida de acuerdo con las reglas de fijación. Para la columna de resina, la fijación de una cama es empleada y el agua salada fría es suministrada al tope de la base para obtener agua fresca y entonces el agua fresca es suministrada a la base del tope para regeneración.

El método de regeneración por medio de agua caliente está siendo estudiada y, conjuntamente con el Centro de Promoción para la Conversión de Agua de Mar (Fundación) e Industrias Químicas Mitsubishi, LTD. en la planta de tratamiento de Minami-Sunamachi del Gobierno Metropolitano de Tokio para la desalinización del alcantarillado de la ciudad.

4.3.4. CONCLUSIONES ACERCA DE LA DESMINERALIZACION CON INTERCAMBIO IONICO

Para desalinización con intercambio iónico por resina, se utiliza el método de resina de intercambio catiónico tipo K y un método utilizando resina de intercambio aniónico tipo O. Los métodos presentan en la resina algunos problemas que hay que observar, y el tratamiento del agua de desecho de los procesos de regeneración, el uso del método de regeneración por agua caliente hace posible una mejor aplicación de éste proceso para desalinización de agua de mar.

4.4. DESTILACION SOLAR

La obtención de agua potable a partir de agua salobre o agua de mar, es un proceso cada vez más importante.

Existen ya muchos países interesados en la destilación solar del agua. Puesto que el agua potable es escasa e insuficiente para cubrir las necesidades, es de esperar que éste interés aumente rápidamente durante los últimos años.

A veces se denominan alambiques solares a los aparatos que, empleando la energía solar, transforman el agua contaminada o salobre en agua potable. Su construcción se basa exclusivamente en el efecto de invernadero y no exige ningún tipo especial de tecnología. Por otra parte, se ha observado que el agua destilada por la acción del sol es,

generalmente, muy pura.

La forma como funciona el destilador solar es igual al proceso de evaporación natural, mediante el cual el agua de mar se convierte en agua dulce.

4.4.1. PARTES DE QUE SE FORMA EL DESTILADOR SOLAR

El destilador solar está constituido de las siguientes partes principales: cubierta de vidrio transparente, un recipiente o charola para el agua salada, conexiones de entrada y salida del agua de mar y agua destilada respectivamente; un drenaje para el agua salada remanente y los canales colectores del destilador o agua producto.

La cubierta transparente permite el paso de los rayos del sol para lograr el calentamiento del agua y su evaporación. Asimismo la superficie interior de la cubierta sirve para condensar el vapor del agua de mar o salobre, la que generalmente es de vidrio.

También se utilizan plásticos transparentes, pero estos se deterioran fácilmente y en ocasiones necesitan soportes para evitar que se flexionen.

La charola del destilador es el recipiente que contiene al agua salada que será evaporada. Esta charola también tiene un canal de colección para el agua condensada, generalmente en la parte donde descansan los vidrios. Estas charolas se constituyen de un material que sea resistente a la oxidación, debido a que el agua de mar cuando es calentada adquiere propiedades corrosivas. Generalmente la charola es de fibra de vidrio.

La charola se pinta de negro mate anticorrosivo en todo su interior para ayudar a la mejor evaporación del agua. Esto se hace con pintura ahulada de color negro.

Las tuberías que tiene el destilador son: la alimentación del agua salada a la charola del destilador, la de salida del agua condensada y, en el fondo de la charola, una salida del agua salada remanente. Estas conexiones generalmente son de P.V.C.

4.4.2. DIFERENTES TIPOS DE DESTILADORES SOLARES

La operación de los destiladores solares está basada en las mismas consideraciones teóricas, así que los diseños reales sólo se diferencian geoméricamente en la forma de soportar la cubierta; en

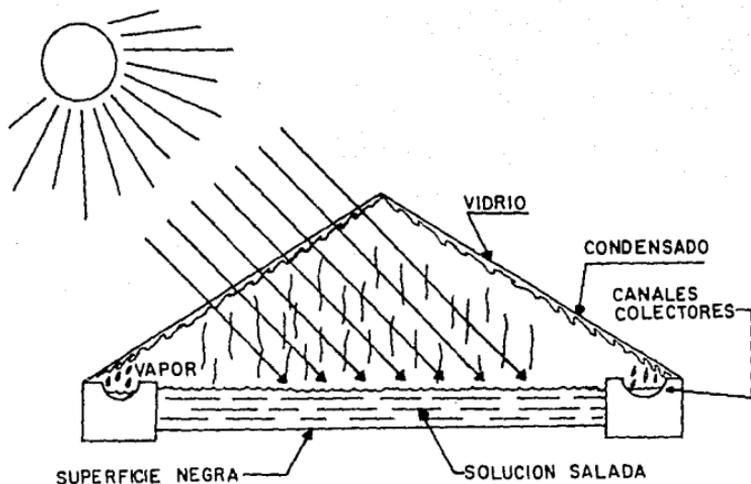


Figura 4.0. Partes de que se compone un destilador solar simple.

como se alimenta el agua salada; en cómo se realizan las descargas del destilador y la salmuera y en los materiales de construcción.

A su vez, todos los diseños buscan el máximo rendimiento de agua destilada por m^2 del destilador. El área a la que nos referimos es la cubierta transparente del mismo.

Algunos de los destiladores solares más comunes son los que a continuación se mencionan:

Cubierta de pirámide, cubierta a dos aguas, diente de sierra, de escalones o cascada, de doble recipiente, de cubierta de plástico en "V" invertida, de cubierta de plástico inflada como domo, etc., algunos de los cuales se muestran en la figura 4.10.



PANALES DE VIDRIO CONTINUO SOBRE UN RECIPIENTE



TECHO DE VIDRIO A DOS AGUAS



TECHO "DIENTE DE SIERRA"



TECHO DE PLASTICO INFLADO (abandonado)



TECHO DE PLASTICO DESINFLADO (abandonado)

Figura 4.10. Principales formas de los destiladores solares.

El rendimiento de cada uno de los diseños debe ser determinado experimentalmente para cada lugar. Se están haciendo numerosos estudios para conseguir la máxima eficiencia a un costo mínimo. Algunos autores piensan que, en el futuro, pueden ser mas rentables alambiques donde se realice una concentración de la energía solar, por ejemplo, mediante espejos parabólicos. En la actualidad, resultan más económicos los pequeños dispositivos, para uso individual o familiar.

Para obtener agua en las cantidades que requiera una población rural o pesquera pequeña (que es el objetivo de esta tesis), se pueden instalar varios destiladores en serie. Tal instalación puede hacerse con cualquier tipo de destiladores, de los que se han visto en las figuras anteriores (como posteriormente se verá en el el diseño particular).

La elección del destilador que se empleará depende del rendimiento que tenga, a la facilidad de construcción e instalación, al mantenimiento requerido, etc.

Un ejemplo de lo antes dicho es el dibujo de la siguiente batería de destiladores donde se utiliza el de cubierta de diente de sierra.

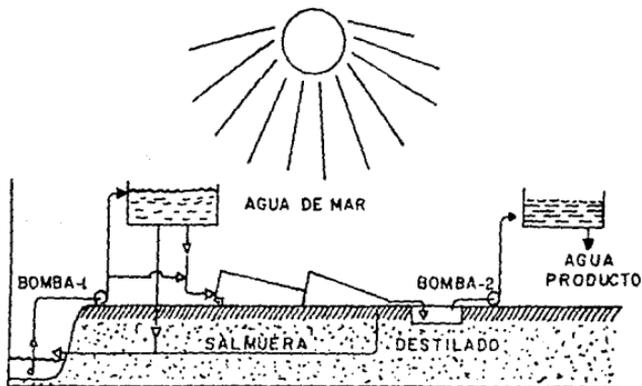


Figura 4.11. Ejemplo de destiladores en batería o en serie.

En esta instalación las bombas del dibujo son eléctricas, que es propiamente la única aportación de energía externa para la destilación, pero esto también puede hacerse utilizando celdas fotoeléctricas que producen electricidad por medio del sol, y almacenando ésta por medio de baterías para la operación durante la noche.

De una manera general, el agua destilada, ya sea mediante el sol o por cualquier otro procedimiento, no resulta cara cuando se utiliza como bebida para el hombre o los animales, pero es prohibitiva cuando se desea emplear para el riego siendo que esta agua es tan necesaria para las plantas como para los animales.

Una de las razones de que el agua obtenida por destilación solar sea prohibitiva para el cultivo reside en el gran desperdicio que tiene lugar en los sistemas de riego empleados actualmente. En ellos, parte del agua se filtra a través del suelo, parte se evapora y pasa a la atmósfera, y sólo una pequeña porción se utiliza para el fin perseguido. Sobre esta base, diversos autores han diseñado un dispositivo que permite destilar el agua en el invernadero mismo, sobre la zona de cultivo.

El dispositivo consta de los siguientes elementos:

- a) Un suelo recubierto de un medio apropiado de cultivo (tierra de labor);
- b) Algunos recipientes elevados con relación al suelo anterior, que contiene al agua salobre a destilar y;
- c) Una techumbre formada de elementos inclinados de plástico o vidrio.

En la figura 4.12 se observa que el dispositivo permite la destilación del agua en el mismo sitio donde se va a emplear y que además, se evitan las pérdidas de agua por filtraciones y evaporación.

Se han realizado diversas modificaciones de este diseño inicial. El conjunto es particularmente interesante en regiones tropicales, áridas y soleadas. Su precio de venta es mucho más aceptable que cuando se construyen por separado, el invernadero y el alambique.

Como ejemplo más reciente se puede mencionar la granja piloto que la Universidad Hebrea de Jerusalén posee en el desierto de Negev,

donde la única agua que puede encontrarse es la subterránea salina. Los resultados obtenidos en esta granja piloto son tan satisfactorios que no es de extrañar el que pronto se inicie la construcción de granjas análogas en otras zonas desérticas.

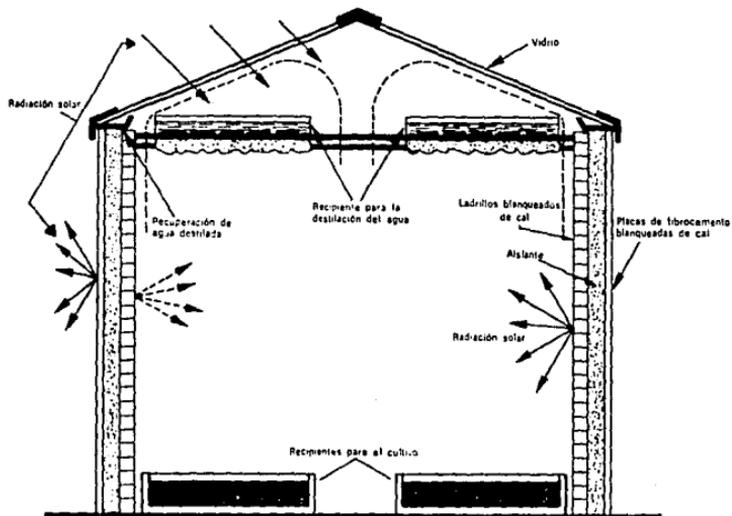


Figura 4.12. Esquema de un conjunto solar de invernadero-estambique.

5. DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESTILACION SOLAR

5.1. GENERALIDADES

En este tema se resumen un estudio sobre la posibilidad de destilar agua de mar, aprovechando para ello la energía proveniente del sol. El objetivo es desarrollar un sencillo y económico destilador solar de agua marina, capaz de abastecer en cantidades del orden de los 500 a 1,000 litros diarios, y analizarlo económicamente para establecer la conveniencia de industrializarlo. El destilador está orientado a zonas del país donde la carencia de agua potable es aguda y hay disponibilidad de agua de mar. Por sitio se eligió el estado de Baja California Sur, y las instalaciones físicas se decidió que se hicieran conjuntamente entre el Instituto Tecnológico de La Paz y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en terrenos del primero.

Con el propósito de seleccionar las características deseables del diseño se hizo una exhaustiva búsqueda bibliográfica y una cuidadosa revisión de los principios físicos y tecnológicos de los destiladores

solares existentes, tanto en México como en el extranjero. Atendiendo en buena parte a las opiniones de los expertos mexicanos en el tema se acordó un diseño plausible. Este consiste en un sistema de captadores solares planos con su tanque de almacenaje térmico, y un sistema de charolas de destilación en cascada, permitiendo el reuso del calor solar.

En éste capítulo se propone un método para el diseño de un destilador solar usando como criterio de análisis el económico para encontrar el que sea óptimo en cuanto a eficiencia y funcionamiento.

Además de que muchas de las ecuaciones del modelo han sido propuestas por autores de prestigio, éstas fueron validadas experimentalmente por los investigadores del Instituto de Ingeniería, por lo que la confianza en el diseño es, por tanto, elevada y fundamentada, así como el prototipo que está en proceso de construcción, el cual fue programado para ser probado y evaluado durante la segunda mitad de 1976.

De la evaluación de experiencias, se desprende la conveniencia de emplear un principio físico en particular, que se conoce como "Destilación por difusión de aire, o destilación por gradientes de presiones parciales de vapor de agua".

El dispositivo seleccionado debe satisfacer los requisitos siguientes:

- Un mínimo de atención para fines de operación y mantenimiento.
- Costo inicial mínimo, lo que se traduce en que la producción de agua potable por unidad de superficie de captación solar sea máxima.
- Captar radiación solar sin sistemas de enfoque, ésto es, emplear captadores planos.

Los requisitos anteriores se satisfacen empleando destiladores de etapas múltiples, ésto es, sistemas de destilación en los que se utilice varias veces el calor captado de la radiación solar.

Por otra parte, el dispositivo seleccionado debe tener un mínimo de partes móviles en el sistema; el empleo de energía no solar debe ser mínimo; y su fabricación debe ser con partes de origen local.

Estas características se cumplen mediante el empleo de un

dispositivo que utiliza un sistema de captación de energía solar muy similar a los convencionales, integrado por : 1) un tanque de almacenamiento térmico que retenga la energía captada por el sol; 2) un conjunto de captadores solares operando todo el año en una posición fija; y, 3) un sistema de circulación del agua que arranque y pare de acuerdo con las necesidades del sistema de destilación, con un mínimo de complejidad en las acciones de arranque/paro del equipo.

El conjunto anterior, que en lo sucesivo será denominado como "subsistema de aportación de energía", cederá calor al destilador solar el tiempo que sea requerido, empleando para ello un mínimo de equipo de control, equipamiento y recursos en general.

El propósito perseguido se logra mediante la combinación de los subsistemas electromecánicos que se mencionan a continuación:

- Una sola bomba que circule el agua a través del campo de colectores y del cambiador de calor, el cual alimenta de calor al destilador. Cuando no haya suficiente cantidad de energía solar incidente, o en las noches, la bomba solo proporciona calor del almacenamiento térmico al destilador, sin circular el agua por los captadores solares.
- Un sistema independiente del anterior que circule el agua de mar a través de un cambiador de calor, para recoger el calor del subsistema de aportación de energía y llevarlo al destilador solar. Es siempre preferible operar el sistema cuando el nivel de energía térmica del almacén sea suficiente para proporcionar la destilación de diseño, y no dejar de operar el destilador durante la noche, ya que producirá agua continuamente aunque no siempre dentro de las condiciones óptimas.

El proceso descrito de la forma anterior puede tener los siguientes equipos de bombeo: uno para el subsistema de captación de energía solar, y otro que tome el agua de mar para enviarla al destilador, la circule en el cambiador de calor y la regrese más caliente al propio destilador.

Debido a las consideraciones hechas, ambas bombas operarían día y noche, y el único requisito de control sería una válvula selectora de

paso para que el agua del primer subsistema (el solar), circulara a través del cambiador de calor correspondiente ininterrumpidamente, y pasara por los captadores solares únicamente cuando la radiación solar disponible así lo hiciese conveniente.

Por lo tanto, nuestro equipo de desalación estará formado de un sistema solar de calefacción que debe acumular suficiente calor en su tanque térmico para mantener funcionando las 24 horas del día al dispositivo de desalación. Este "subsistema" sería sumamente parecido a un calentador solar convencional, aunque dispondría de una extracción de energía útil constantemente a lo largo de todo el día, y por otro lado, un destilador solar, calentado mediante el subsistema solar que ya se comentó para operar en forma continua, con un suministro de energía constante.

Así, partiendo de la base que el destilador solar está instalado en un contenedor que permite un mínimo de fugas de calor (sistema tipo adiabático), y por tanto independiente de las características ambientales, el equipo en conjunto es susceptible de análisis en dos subsistemas independientes: el de captación y el de almacenamiento.

El análisis de estos subsistemas de energía se hace mediante un modelo similar al que simula un conjunto de colectores y tanque para aplicaciones domésticas, haciendo desde luego las adaptaciones para aceptar las características particulares del calentador que aquí interesa, tales como su vidrio doble, superficie de alta calidad, gran cantidad de aislamiento térmico en la parte posterior de las orillas, etc. Varios modelos matemáticos pueden emplearse, y tener sencillas, en este estudio, se ha empleado un modelo con gran flexibilidad para estudiar el comportamiento dinámico de captadores planos y tanque de almacenaje, el cual fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería.

La diferencia fundamental entre estudiar un calentador del tipo empleado en destiladores solares y los calentadores domésticos convencionales, es que para los primeros la carga térmica útil es constante todo el día dadas las necesidades del destilador.

Así, para hacer la mejor simulación del comportamiento del subsistema de captación de energía, es necesario saber de antemano los requerimientos térmicos.

El destilador en sí es una pila de charolas dentro de un recipiente o contenedor que debe permitir un mínimo de fugas de calor

al exterior.

La charola más baja es la que recibe la calefacción externa mediante un cambiador de calor que se alimenta del agua caliente del tanque térmico.

La charola más superior rechaza calor al ambiente mediante la circulación continua de agua de enfriamiento (que podría ser agua de mar) haciendo uso de ventiladores que se encargan de realizar dicha labor.

De esta forma, entre dos charolas contiguas, la de abajo estará más caliente que la de arriba, y evaporará hacia ella escurriendo el agua condensada por la parte de abajo, hasta unas canaletas que se encuentran en los lados, por medio de las cuales se capta el producto absorbiéndose el calor de destilación para reusarlo.

El conjunto de aparatos así dispuestos representa un problema de optimización. Desde el punto de vista del subsistema de captación de energía solar se desearía operar a bajas temperaturas, con el fin de obtener eficiencias elevadas. Por otro lado, desde el punto de vista del destilador, mientras mayor sea la diferencia de temperaturas entre las dos charolas extremas mayor será la producción de condensado en cada una, y mayor el número de charolas apiladas.

Consecuentemente, para una diferencia de temperaturas establecidas, hay un número óptimo de charolas con el cual se obtiene una producción máxima de condensado; sin embargo, dado que las temperaturas de las charolas extremas varían a lo largo del día, la selección del conjunto óptimo es función de las características cambiantes de la radiación solar y de las temperaturas ambientales.

El conjunto de charolas apiladas no parece haber sido estudiado con anterioridad, aunque la geometría y los fenómenos físicos que se presentan son muy similares a los del destilador de caseta. Por tal motivo se hizo una proposición consistente en un conjunto de charolas transparentes, dispuestas en forma tal, que pudiesen ser calentadas por el sol a través de las paredes laterales (que también son transparentes), con el propósito de producir agua destilada en las regiones polares, pero tenía el inconveniente de no disponer de recursos para minimizar el calor perdido al ambiente y no ofreció ninguna ventaja al respecto.

5.2. MODELOS MATEMATICOS PARA DISEÑAR DESTILADORES SOLARES

Mediante la revisión de trabajos realizados en el Instituto de Ingeniería, se obtuvieron resultados útiles para ser aplicados haciendo la representación matemática de la destilación solar en diversos equipos. Gracias a ello el proceso de destilación solar podemos emplearlo en forma directa en muchos lugares de la República Mexicana, ya que las características particulares de estos sistemas proporcionan economía, utilidad y bajo mantenimiento, que son las principales ventajas que debemos observar.

La cantidad de calor que se transmite por evaporación convectiva a través de una película de aire de espesor inferior a 0.5 m y la superficie de agua es:

$$Q_{sc} = 0.8847 (P_s - P_c) h_{sc} A_e h_{fg} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

P_s = Presión absoluta del vapor en la superficie del agua a evaporar en bar.

P_c = Presión absoluta del vapor en la superficie del condensado en bar.

h_{sc} = Coeficiente de transmisión de calor entre ambas superficies.

A_e = Superficie libre de agua a evaporar.

h_{fg} = Entalpía de evaporación a la temperatura del agua.

El coeficiente de transmisión (h_{sc}) de calor se encuentra dado por la relación empírica siguiente:

$$h_{sc} = 8.8418 \times 10^{-4} [(T_s - T_c) + (P_s - P_c) / (2.779 - P_s)]^{1/8} \dots \dots (2)$$

Donde:

T_s = Temperatura del agua en °K

T_c = Temperatura del condensador en °K

P_s y P_c = mismos conceptos de la (1).

Para facilitar el cálculo de las cantidades involucradas, se sugiere el uso de las aproximaciones proporcionadas por las tablas de vapor obtenidas con las siguientes ecuaciones:

$$h_{fg} = 3.161.5 - 2.40741 T \quad \dots\dots(3)$$

$$P_{v \text{ de } c} = \exp (25.317 - 5144 T^{-1}) \times 10^{-8} \quad \dots\dots(4)$$

El flujo instantáneo de vapor se obtiene mediante el cociente de las ecuaciones (1) / (3).

Dado que la producción de vapor resulta en una caída de temperatura del agua evaporada, la variación de temperatura está dada por:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_{e c}}{M_a c} \quad \dots\dots (5)$$

Donde:

M_a = Total de masa del agua que evapora.

c = calor específico del agua evaporada.

Por otro lado, para representar esquemáticamente la operación del destilador solar propuesto se le refiere al lector a la figura 5.1.

El agua de la charola de la base es continuamente recalentada mediante un cambiador que toma calor del subsistema de calefacción solar. Las charolas superiores (se muestran solo 3 en el esquema) tienen un derramador central que asegura su nivel, bombeándose agua de mar para el sistema y vertiéndose en la charola 1.

En el esquema que representa un condensador en la parte superior para ilustrar el sumidero de calor, se recomienda para el buen funcionamiento del sistema.

Las charolas tienen el fondo con doble pendiente para escurrir el condensado hasta los bordes y extraerlo del tanque adiabático.

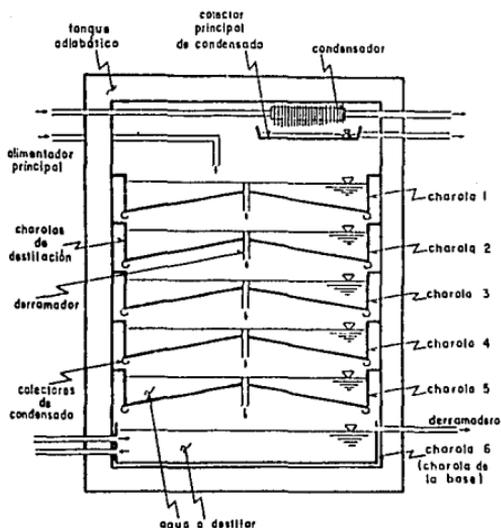


Figura 5.1. Destilador solar tipo caseta de charolas múltiples.

Por otro lado, los flujos de calor que se presentan en los alrededores de cada charola se ilustran en la figura 5.2.

Con m_a se representa la masa de agua adicional proveniente del derramadero; m_i es el flujo de agua derramado a la charola inferior; q_{ci} es el flujo de calor que proviene de la condensación del agua en el fondo de la charola (con subíndice i) y también el que se pierde en la charola analizada a las paredes del recipiente (con subíndice o); q_p es el calor perdido de la charola por conducción a las paredes, y los otros flujos se explican con la simbología empleada.

Al emplear la ecuación (1) para evaluar el flujo de calor entre la superficie del agua que se evaporará y el condensador, o sea, el fondo de la charola encima de la analizada, se consideran ya los flujos de convección de modo que el análisis se simplifica.

Queda así especificado el proceso de cálculo para cada charola.

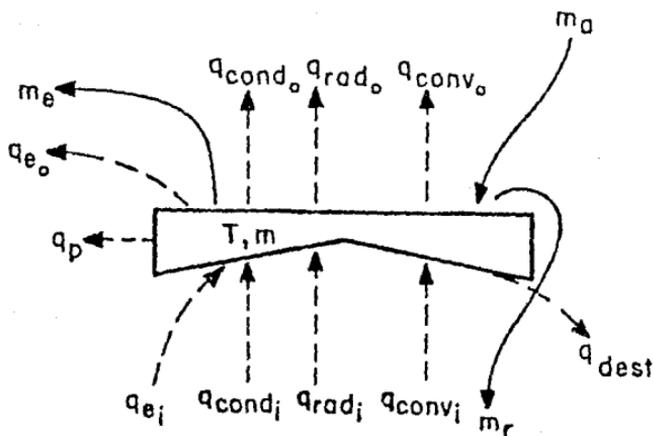


Figura 5.2. Flujo del calor en los alrededores de cada charola.

El procedimiento de cálculo se efectúa así para todas las charolas, incluyendo las dos de los extremos. Si se desea resolver el sistema de charolas en computadora, deben hacerse las consideraciones necesarias para las charolas de los extremos, esto es, la aportación de calor al ambiente desde el condensador superior, como ilustra la figura 5.3.

La computadora, efectúa los cálculos indicados en diferencias finitas de tiempo para el conjunto de datos que se asignan. Para los análisis que se presentan a continuación se supuso que el destilador en conjunto estaba a la temperatura ambiente inicialmente, y que las temperaturas subirían a partir del calentamiento de la charola de la base.

El estudio realizado para el destilador indica que se requiere operar el sistema del orden de 14 horas continuas para llegar a

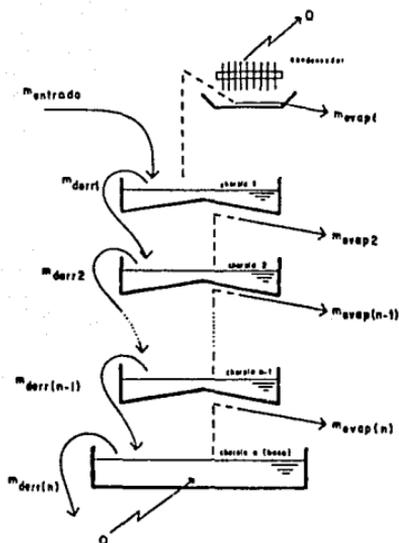


Figura 5.3. Esquema termodinámico general del destilador solar.

condiciones de estado permanente (manteniendo constantes las temperaturas extremas). No obstante, se advierte que las condiciones de la prueba son idealizadas ya que la temperatura de la charola base y del condensador se consideran constantes a lo largo de la prueba.

Es importante destacar, que para este tipo de destilador, a partir de las 14 horas después de iniciada la operación, las temperaturas de las charolas ya no varían, es decir, las diferencias de temperaturas entre una charola y su inmediata superior se mantienen constantes. A partir de este momento los requerimientos del sistema se mantienen sin variación, y el único requerimiento adicional será un suministro de agua del exterior para evitar que las charolas se sequen. En este momento se considera que el sistema está en condiciones de operación de "estado permanente".

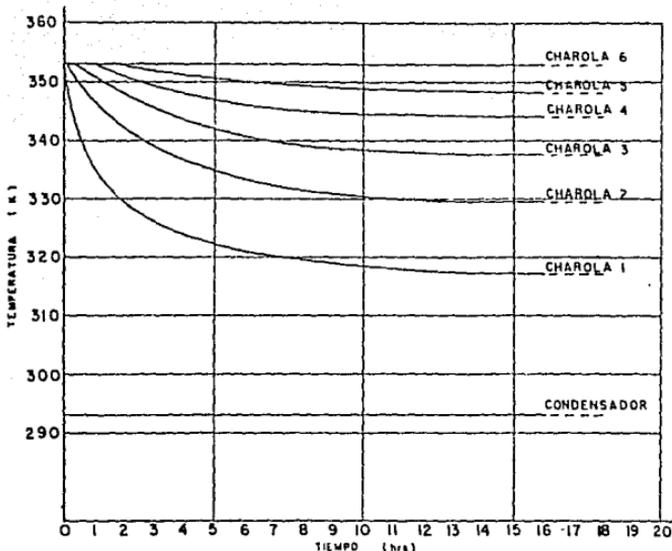


Figura 5.4. Variación de la temperatura del sistema hasta obtener la condición de "estado permanente".

En la figura 5.4 se representan las condiciones de trabajo del destilador a lo largo del tiempo de operación.

Los resultados más relevantes del estudio se resumen en la tabla 5.1 en la que se presenta la información generada para describir las condiciones que prevalecen a partir del momento en que se estabiliza el sistema. Se advierte que, para un número creciente de charolas, la producción de cada una de ellas decrece al tiempo que también baja la energía térmica requerida. El tiempo requerido para alcanzar condiciones de estado permanente aumenta con el número de charolas.

Con la información del cuadro 5.1 se elaboran las figuras 5.5 a 5.6.

En la figura 5.5 se observa que la energía requerida por unidad de masa de agua destilada disminuye conforme el número de charolas por unidad aumenta, además aquí se aprecia que, para producir una cantidad

CUADRO 5.1. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DEL DESTILADOR

No. charolas por unidad	Producción estable (Kg/hr)	Energía requerida (KJ)	Energía específica (KJ/Kg)	Tiempo aprox. de estabilización (Choras)
1	13.95	32,242	2,311.25	0
2	10.88	12,583	1,155.72	2
3	9.44	7,361	779.77	3
4	8.55	5,007	585.61	5
5	7.92	3,715	469.07	8
6	7.44	2,912	391.40	12
7	7.06	2,370	335.69	17
8	6.78	1,933	294.01	22
9	6.49	1,605	251.17	28
10	6.27	1,475	235.29	37
15	5.79	212	157.49	220
20	4.98	590	118.51	712

de agua destilada al día, se debe emplear cierta cantidad de unidades destiladoras, todas ellas con cierto número de charolas; a mayor número de charolas por unidad, menor será el número total de unidades destiladoras que se requieren.

Por otro lado, en la figura 5.6 se observa que la producción promedio por charola también disminuye al aumentar el número de charolas por unidad desaladora.

La figura 5.7 representa la producción por unidad (suma de la producción de cada charola en una unidad desaladora).

La figura 5.8 ilustra, usando una escala semilogarítmica, el tiempo requerido para la estabilización al 10 %, es decir, cuando el calor suministrado y el retirado tienen una diferencia entre sí del 10 % o menos.

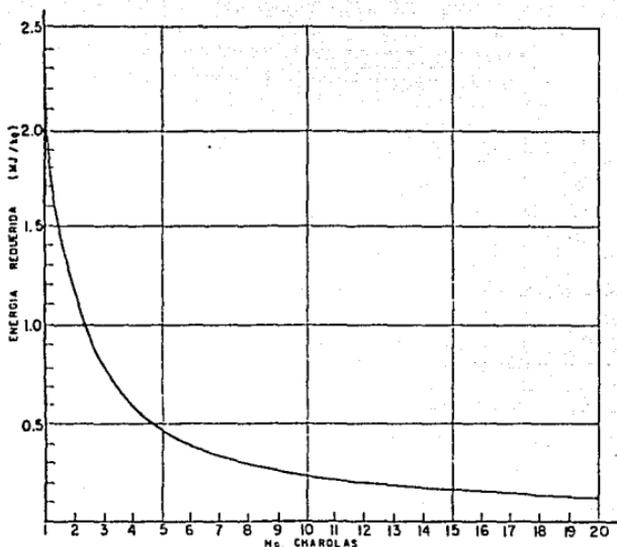


Figura 5.5. Energía requerida Vs. número de charolas.

La figura 5.9 representa el número de unidades requeridas para una producción de 750 Kg al día trabajando 24 horas diarias en el proceso de destilación.

5.3. CONSIDERACIONES ECONOMICAS

De la figura 5.5 se concluye que al aumentar el número de charolas por unidad, la energía requerida para llevar a cabo la destilación disminuye; esto implica que el costo de la energía requerida disminuya.

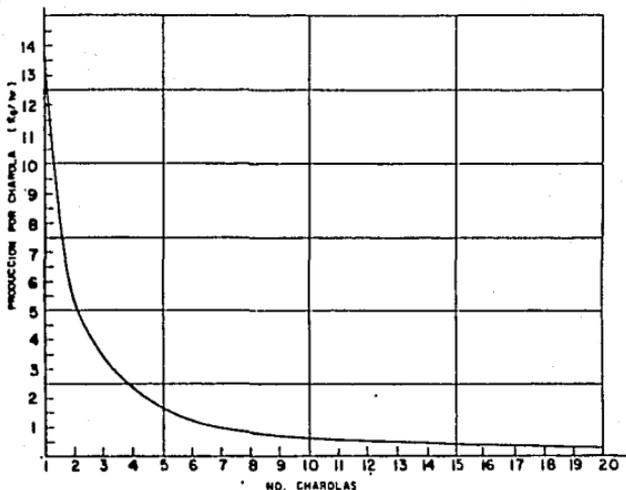


Figura 5.6. Producción por charola Vs. número de charolas.

Por otro lado, en la figura 5.9 se observa que al aumentar el número de charolas por unidad, el número de charolas totales $n \times N$ (donde n es el número de charolas por unidad y N es el número de unidades requeridas) aumenta rápidamente, lo que implica un aumento en el costo del equipo de destilación.

El número óptimo de charolas de destilación por unidad estará determinado tanto por el costo del equipo de destilación como por el costo de la energía requerida.

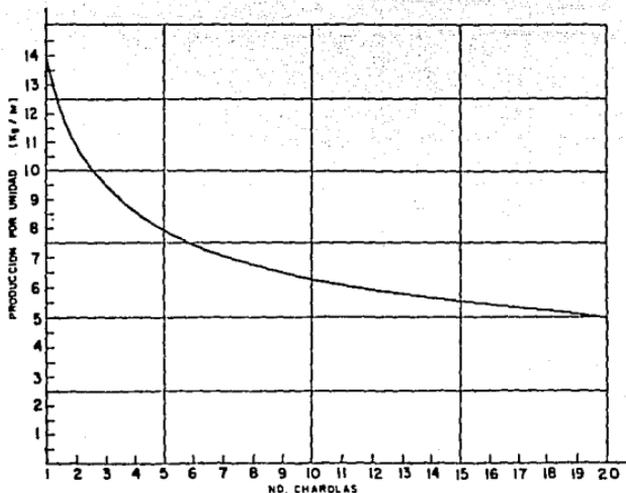


Figura 5.7. Producción por unidad destiladora Vs. número de charolas.

Para un análisis económico es de interés primordial el producto $n \times N$ y la energía requerida por kilogramo destilado (E). Se ajustan por mínimos cuadrados las curvas de la figura 5.5 y 5.9 respectivamente obteniéndose las siguientes ecuaciones con el mejor ajuste posible:

$$N = (1/P) 54.21600911 n^{0.244564812}$$

$$E = 2320.236785 n^{-0.0040548920}$$

Donde:

n = Número de charolas por unidad incluyendo la de la base.

N = Número de unidades requeridas para una producción de "P" Kg.

E = Energía requerida en KJ para destilar un Kg de agua.

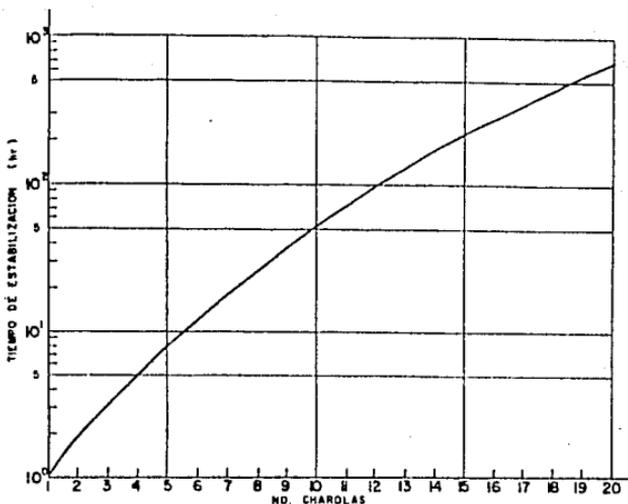


Figura 5.8. Tiempo de estabilización Vs. número de charolas.

Estas ecuaciones representan ajustes con coeficientes de correlación superiores a 0.9999, por lo que pueden ser empleadas para el estudio del destilador de múltiples charolas (cabe recalcar que el destilador trabaja con temperaturas constantes para la charola de la base, un condensador de 353° K y 293° K respectivamente).

Considerese el costo C_1 de una unidad de 10 charolas que incluyen todo lo necesario para su funcionamiento como equipo de destilación (no se incluye el costo de la energía). Se define, en este trabajo, el "costo-charola-unidad" (aa), mediante la siguiente ecuación:

$$aa = C_1 / 10$$

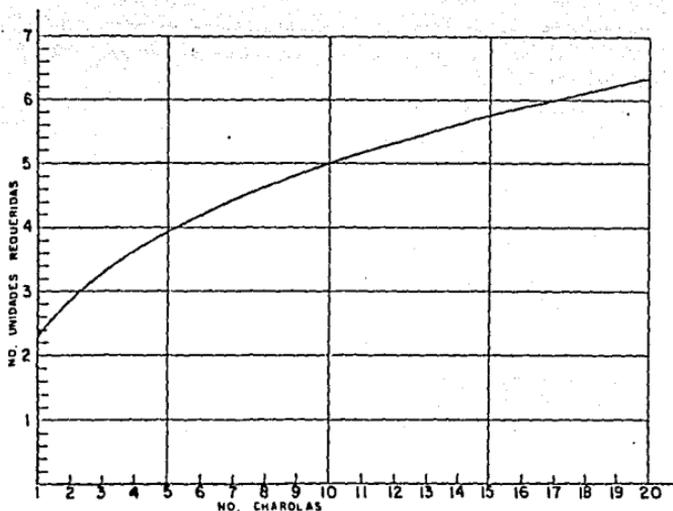


Figura 5.9. Número de unidades de destilación como función del número de charolas de cada unidad.

Con esta base se puede obtener el costo aproximado de la unidad de 5 charolas (por ejemplo), mediante el producto $aa \times 5$.

Por otro lado, si se considera el calentamiento de la charola de la base mediante energía solar, se puede definir otra variable llamada (bb), e igual al costo de instalación por kJ. Este valor se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$bb = C_2 / 50\ 000$$

Donde:

C_2 = Costo estimado de una instalación solar de temperatura media (produce agua en un rango de temperaturas de 80° C a 110 °C) de la que podemos obtener 50 000 kJ al día.

Procediendo del mismo modo se puede calcular de manera aproximada el costo de una instalación que permita obtener, por ejemplo, 40,000 kJ por día, como $bb \times 40,000$.

Con la ayuda del procedimiento anterior se escriben las ecuaciones que permiten calcular los costos aproximados de los equipos para llevar a cabo la destilación de 750 kg de agua al día, obteniéndose:

$$C_d = 54.21800911 n^{1.244564812} aa / t$$

$$C_e = 1740177.574 n^{-0.0040048020} bb$$

donde:

C_d = Costo del equipo de destilación (dólares E.U.).

C_e = Costo del equipo de calentamiento solar (dólares E.U.).

C_t = Costo total del equipo de la planta destiladora (dólares E.U.).

n = Número de charolas por unidad incluyendo la de la base.

t = Tiempo de operación del sistema en horas.

aa = Costo por charola y por unidad (dólares E.U.).

bb = Costo de instalación por KJ (dólares E.U.).

Se selecciona el dolar como unidad monetaria debido a que de esta manera es más fácil predecir la inflación.

5.4. SELECCION DEL DISEÑO OPTIMO

En la figura 5.6 se considera $aa = 60$ y $bb = 0.022$. El mejor diseño corresponderá a aquél para el cual el costo total acumulado sea mínimo.

Se obtiene que el diseño óptimo estará entre 5 y 13 charolas por unidad incluyendo la charola de la base. El costo total de inversión será de un poco menos de \$7,900.00 dólares E.U. para los destiladores propuestos.

También podemos obtener el costo del kg (o litro) de agua destilada, para lo cual se realizan tres estudios:

Primeramente se supone el interés y la inflación en dólares, iguales ambos a 0 % anual.

Segundo: Se supone el interés igual a 6 % anual y la inflación igual a 2 %.

En el tercero se consideran el interés y la inflación de 11 % anuales.

En todos estos casos se considera una vida útil de los equipos, tanto solar como de destilación de 15 años, y un valor de rescate de los equipos del 10 % de su costo afectado por la inflación.

Estas dos consideraciones resultan muy conservadoras ya que los costos por litro de agua obtenidos son de \$ 0.0015.00, \$ 0.0025.00 y \$ 0.0020.00 dólares E.U. respectivamente para los tres estudios.

Considerando los datos tomados del estudio de la situación económica de los Estados Unidos, publicados en el examen de la situación económica de México de Banamex en diciembre de 1986, se puede suponer que el segundo de los tres estudios precedentes podría representar una situación realista para México. Este resultado se resume en la tabla 5.2. en la siguiente página.

En este estudio no se han incluido los costos de operación, los cuales se suponen menores en general a los costos considerados y que no afectarán los costos del litro de agua producido en forma perceptible.

CUADRO 5.2. ESTUDIO ECONOMICO ESTIMADO PARA CALCULAR LOS COSTOS DEL DESTILADOR SOLAR

Y A S A	A Ñ O: 1986	1987 (Estimado)
Libor.	6.8 %	7.0 %
Prime Rate.	8.2 %	9.5 %
Inflación en E.U.	2.4 %	2.5 %

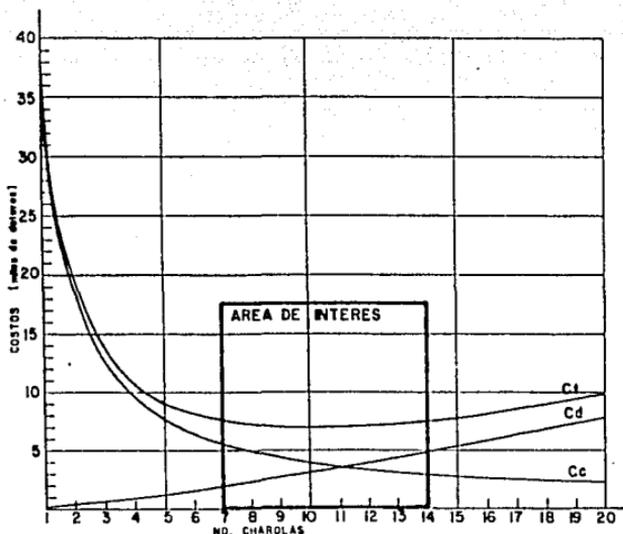


Figura 5.10. Selección económica del número de charolas.

5.5. CARACTERISTICAS GENERALES DE LA PLANTA PILOTO

Con una superficie de pintura negra mate puede absorberse hasta un 95 % de la radiación que alcanza al colector, y sólo es reflejada una mínima cantidad. Con un tratamiento químico especial se puede aumentar la cantidad de radiación absorbida. A estas superficies se les llama "superficies selectivas de radiación".

Las investigaciones sobre este tipo de superficies se han dirigido principalmente a su aplicación en sistemas de energía solar en que se necesitan temperaturas muy altas y por lo tanto el rendimiento máximo de los colectores. No obstante, una modalidad de pintura barata puede ser de gran valor para aumentar el rendimiento de los colectores planos empleados en edificios, como son los que se utilizan por ejemplo en sistemas de refrigeración solar.

Casi todas las superficies selectivas que se han fabricado hasta la fecha utilizan los llamados "efectos de interferencia" que se

producen en capas de espesor microscópico en las que se alternan metal y películas negras de óxido metálico.

Además de los cambios de estado físico, el calor latente se puede también almacenar mediante ciertas reacciones químicas. Por ejemplo, uno de los materiales más usados para el almacenamiento de calor ha sido el sulfato sódico hidratado o sal de Glauber, ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Es una sustancia relativamente barata, y en cualquier caso se necesitan cantidades mucho menores que las que harían falta de piedra o agua. Cuando la sal de Glauber alcanza temperaturas por encima de los 32°C se disocia en la forma anhidrica Na_2SO_4 + agua y el resultado es una solución concentrada de sal en agua. La reacción es:



Según avanza la reacción en una dirección, almacena mucho calor, y según avanza en la otra, lo expulsa. Para el uso práctico, lo que se necesita es una reacción química o un cambio físico que se produzca dentro de los límites de temperatura en que se recoge y se almacena el calor, y para la calefacción la reacción de la sal de Glauber a 32°C resulta muy apropiada. El cuadro número 5.3 proporciona cifras comparativas de la capacidad calorífica de depósitos de agua, de piedra y de la sal de Glauber en que el agua y las piedras se suponen operando a una temperatura de 20°C .

CUADRO 5.3. CAPACIDAD CALORIFICA DE DEPOSITOS DE AGUA

Material	Temperatura	cal g^{-1} grado $^{-1}$	Kcal Litro $^{-1}$	Btu lb $^{-1}$	Btu ft $^{-3}$
Agua	20°C (36°F) exceso	1	20	36	2 240
Guijarros (piedra con $1/3$ de aire)	20°C (36°F) exceso		8.0		864
Sal de Glauber	32.3°C (90°F)		84.5	104	9 568

Se probó que pueden arreglarse los colectores solares de diversa forma sin que se requieran dispositivos de control que procuren la distribución uniforme del agua en los diversos ramales, ya que existen mecanismos naturales que aseguran que la distribución sea adecuada.

Esas experiencias llevaron a adoptar un arreglo de colectores como el mostrado en la figura 5.11. En el arreglo presente, los cabezales de los captadores se conectan en serie, lo que reduce el costo de las tuberías y el espacio requerido para el arreglo.

De acuerdo a lo anterior se adoptó una distribución de ocho captadores en paralelo, divididos en dos grupos, como se ilustra en la figura 5.11. Se acordó que el agrupamiento de cuatro unidades garantizaba el mejor arreglo para operación normal como en caso de paros eventuales para fines de mantenimiento.

Los 32 captadores se deben orientar hacia el sur, e inclinarse 24° con respecto al plano horizontal (valor igual a la latitud local) para asegurar una máxima captación de radiación solar a lo largo de todo el año. Los cuatro módulos de ocho captadores en serie, cada uno se montó sobre soportes de acero estructural ligero, fabricado en ángulo de $15'' \times 1.5'' \times 0.125''$, en bancos de cuatro captadores cada uno.

La separación entre captadores contiguos está fijada por los propios soportes en 0.10 m. La conexión entre los cabezales se hace con mangueras y abrazaderas, probadas para operar a presiones hasta de 1 bar y temperaturas hasta de 100°C . Se dejan claros de 0.01 m entre los bordes de los cabezales para absorber dilataciones térmicas y evitar deformaciones (figura 5.12).

La separación entre los módulos en la dirección N-S es de aproximadamente 1 m. Esta separación es suficiente para evitar que un módulo produzca sombra sobre otro casi en la totalidad de las horas de operación del año. A todo el campo de captadores se deberán dar una inclinación de 2 % en las direcciones E-W y N-S, lo cual tiene por objeto facilitar el desalojo del aire de las tuberías. Con este fin se instalan a las salidas de cada conjunto de cuatro colectores, purgas de aire, como ilustra la figura 5.13.

La tubería en todo el arreglo del campo de colectores se aísla térmicamente con "medias cañas" de fibra de vidrio de $1.5''$ de espesor, recubiertas con manta e impermeabilizante sellador (tipo

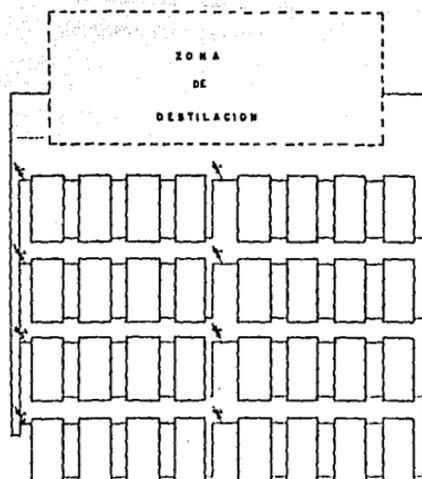


Figura 5.11. Arreglo de los captadores solares (vista en planta).

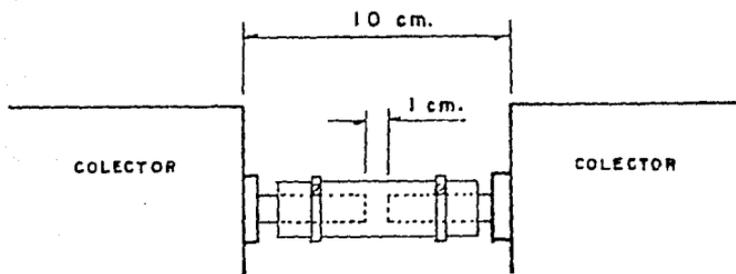


Figura 5.12. Unión entre los cabezales de los captadores solares.

Fiberseal). La última capa sobre el sellador es de pintura para procurar una buena presentación. También se eliminó el uso de recubrimiento aparente de aluminio dado su alto costo. A la entrada y a la salida de cada módulo se instalan válvulas de compuerta de vástago chico; aunque estas válvulas pueden permitir la regulación del flujo en pruebas especiales, no se requerirá moderar el flujo para la operación normal, la función primordial de estas válvulas es que se impida temporalmente la circulación a través de un grupo de captadores para continuar el funcionamiento del resto del conjunto, en caso necesario.

La zona correspondiente a la instalación del destilador, incluye el tanque de almacenamiento térmico del agua caliente, proveniente del campo de colectores (capacidad de 1,800 litros, diámetro = 0.924 m, longitud total = 2.97 m), que tiene espesor de pared de 7.14 mm, tapas semiesféricas, cinco tomas para la entrada y salida del agua caliente, purga de aire y agua, y alimentación de agua. Este tanque está aislado térmicamente con lana mineral y lana de vidrio en un espesor global de 0.1 m aproximadamente.

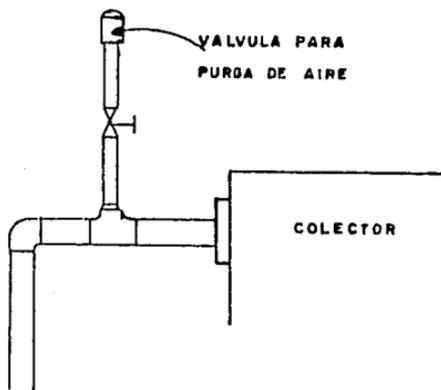


Figura 5.13. Detalle de la colocación de las purgas de aire.

También van en este espacio dos bombas centrífugas de 1.5 H.P. cada una, de alta velocidad (3,470 RPMD, con 1.5'' de succión y 1'' de descarga. Una de las bombas es para el campo solar y la otra para el destilador.

El calor del subsistema solar se transfiere al destilador mediante un cambiador de calor de tubos y coraza de un solo paso, con espejos fijos (soldados a la coraza), abezales y conexiones bridadas. La coraza se forma de acero A-36 de 8'' de diámetro, y contiene 37 tubos de tipo flux de 3/4'' de diámetro y 6 pies de longitud. El arreglo de los tubos es triangular y el flujo externo se canaliza con ayuda de 4 deflectores planos de segmento sencillo. Los conectores son para la tubería de 2''.

En este espacio también está instalada una unidad destiladora, con capacidad productiva de 250 litros/día, y se dejó espacio para la instalación posterior de otras dos unidades de capacidad similar. La unidad instalada en primera instancia tiene una longitud de 3.05 m, ancho de 1.2 m y altura de 2 m. El destilador se fabricó formando las paredes de emparedado de lámina negra calibre 20, conteniendo 0.1 m de aislante térmico, y soportando 8 charolas intermedias construidas en lámina calibre 18 (figuras 5.14 y 5.15) separadas 0.2 m entre sí.

Las charolas extremas estarán, la de la base, separada 0.3 m de la charola que le sigue, para recibir las tuberías que recirculan el agua con el cambiador; y la superior o sumidero, 0.36 m más arriba que la charola que le sigue, con objeto de dar espacio para diversas pruebas. Todo el interior del destilador se protege con recubrimiento anticorrosivo. El fondo del destilador se construye en forma similar a las paredes.

Aunque las políticas de operación y de pruebas del dispositivo se definieron empíricamente en el campo, se estima que la forma de operar normalmente será la que sigue:

Estando el conjunto en frío, se puede operar el subsistema de captación de energía solar hasta alcanzar la temperatura máxima de operación (aproximadamente a 100° C) en el tanque térmico. Estando el destilador lleno de agua de mar, se arranca la bomba de circulación del destilador al cambiador de calor. A partir de este instante se empieza a producir destilado, en cantidades variables según se vayan estableciendo las diferencias de temperatura entre charolas. Ambas

bombas deben operar continuamente para permitir el intercambio de calor con el agua de mar.

5.6. INSTALACION EN EL CAMPO

La instalación del sistema de destilación solar se realizó (como ya se dijo) en terrenos del Instituto Tecnológico de La Paz (ITLP), B.C.S., precisamente al oriente del edificio de la dirección y de la biblioteca, y al norte del laboratorio de alimentos. El ITLP proporcionó la cimentación de las estructuras de los colectores y

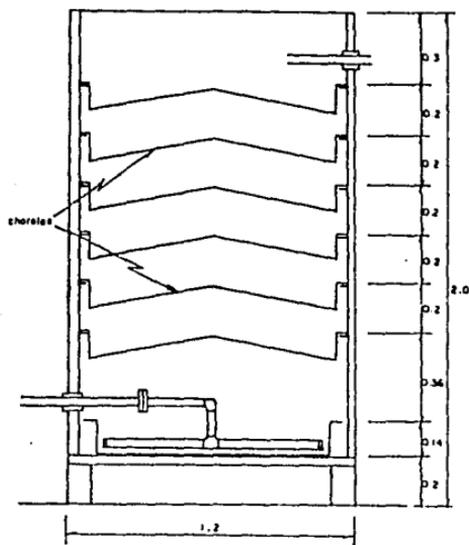


Figura 5.14. Sección vertical del destilador, mostrando conexiones de las principales tuberías.

bloques de concreto para cimentar el destilador, el tanque térmico, el cambiador de calor y las bombas de recirculación. La estructura de soporte del tanque elevado (de 400 litros de capacidad), cuyo fondo

quedó 2 m arriba del nivel medio del terreno, está provista de placas de apoyo, y se vio que no era necesario proporcionar mayor sustentación. Las tuberías de los cabezales de los colectores, así como las interconexiones del resto del equipo, se soportan sobre estructuras angulares de acero, las que a su vez fueron fijadas a las estructuras de soporte del propio equipo.

Las etapas fundamentales del proceso de instalación fueron:

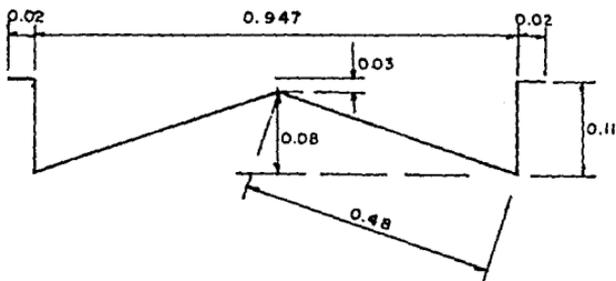


Figura 5.15. Corte seccional de una charola intermedia.

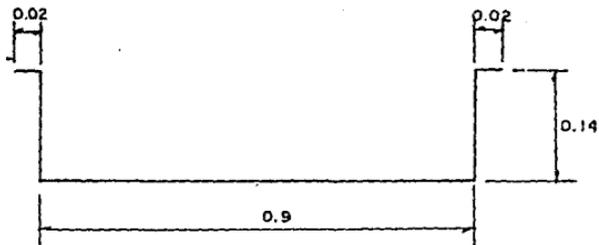


Figura 5.16. Corte seccional de la charola inferior.

- Instalación de las estructuras de acero para recibir a los colectores.
- Instalación de los colectores solares sobre esas estructuras.
- Nivelación del conjunto de colectores para obtener un desnivel del oriente subiendo hacia el poniente y del sur hacia el norte.
- Interconexión de los captadores con tramos de manguera de alta temperatura.
- Instalación del destilador, cambiador, bombas y tanques auxiliares en algún sitio.
- Instalación de la tubería de cobre que interconecta los captadores en el campo solar, los cabezales y el resto de equipo.
- Instalación de la tubería de acero que cierra el circuito del destilador solar con el cambiador de calor.
- Instalación del tanque elevado, del tanque de medición de flujo, sus tuberías y aislamientos.
- Instalación de termopares en equipo y tuberías, y de placas de orificio y manómetros.
- Colocación del aislamiento en las tuberías, tanque térmico y cambiador de calor.
- Aplicación de impermeabilizante y protectores de intemperie en aislamientos térmicos.
- Terminación de la fabricación del destilador, corrigiendo errores de manufactura.
- Calibración de las placas de orificio, corrigiendo sus dimensiones para adecuarse a las características de la instalación.
- Pruebas preliminares de operación para producción de destilado, corrigiendo detalles de sensores.
- Instalación de los soportes de los tubos en forma definitiva, corrección de acabados, retoques y limpieza del terreno.

5.7. CARACTERISTICAS DE LA INSTALACION FINAL

La distribución final de los equipos y las conexiones de tuberías, válvulas y accesorios, fue básicamente la programada, de acuerdo con las especificaciones.

En lo que se refiere a las mediciones se efectuaron las siguientes:

Para el campo solar, se medían periódicamente (cada 15 minutos típicamente) la radiación solar, la temperatura del ambiente, el flujo de agua circulante, y las temperaturas a la entrada del campo solar (salida del cambiador de calor), a la salida del campo (entrada del tanque) y a la salida del tanque (entrada al cambiador de calor). Para el destilador se medían la temperatura del ambiente, que no es siempre igual a la del ambiente de los colectores, la temperatura del agua en cada charola, la temperatura a la entrada y a la salida del cambiador de calor, el flujo de agua a través del cambiador y la producción de agua destilada.

La precisión de las mediciones de la temperatura se estableció comparando las mediciones con los termopares y con un termómetro de mercurio en vidrio, y resultó exhibir errores máximos del orden de 0.3°C y típicos de 0.15°C . La calibración de las placas de orificio en el campo, permitió establecer una buena precisión, aún a pesar de los altos flujos que podían proporcionar las bombas (cada una de 1.5 HP). Los errores máximos son del orden de 0.3 Kg/s en flujos de 5 Kg/s, que son más altos que los flujos normales de operación. A flujo normal, del orden de 1.5 Kg/s, el error típico es de 0.08 Kg/s. La precisión de las mediciones del flujo del agua destilada es muy alta, menor que 1 %, pero la confiabilidad de las lecturas es menor debido al efecto de acumulación en las canales colectoras de condensado. De este modo, se estima que la precisión con que se calculan los flujos de calor con base en las mediciones experimentales es del orden de 10 a 15 %, y que las correspondientes a los cálculos de eficiencia de diversas etapas del proceso es de 15 a 20 %. Sin embargo, y ya que esa precisión se mejora por cancelación de errores en muestras estancadas suficientemente grandes (típicamente cada día de pruebas se obtienen docenas de corridas experimentales), se estima que los resultados globales son representativos de la realidad con un error menor al 10 %.

5.8. JUSTIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROCESO

Este proyecto como muchos otros, fue ensayado en el campo y en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería.

Las figuras 5.17 a 5.18 representan la variación de las

temperaturas a lo largo del periodo de prueba, y se incluye la temperatura del ambiente para fines de comparación. Las pruebas referidas se llevaron a cabo durante las tardes, cuando las temperaturas ambientales eran comparativamente altas y las humedades también. En las figuras, la temperatura más alta corresponde siempre a la charola de la base, la que alcanza su máxima temperatura unos cuantos minutos después de iniciada la operación de la bomba que recircula el agua a desalar a través del cambiador de calor.

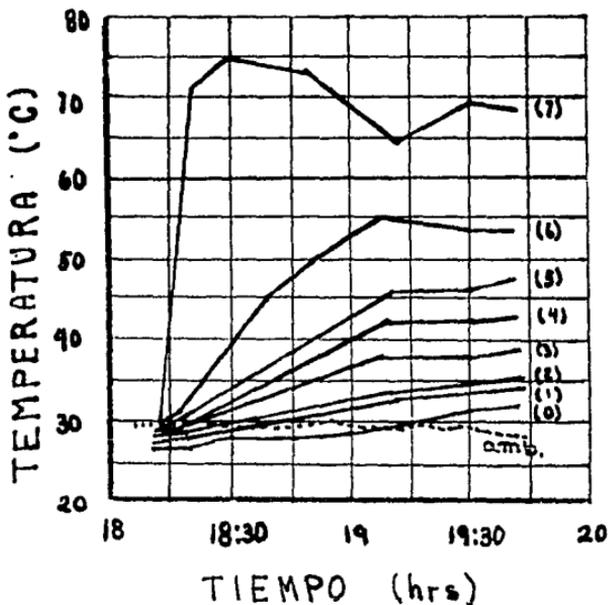


Figura 5.17. Variación de las temperaturas de las charolas.

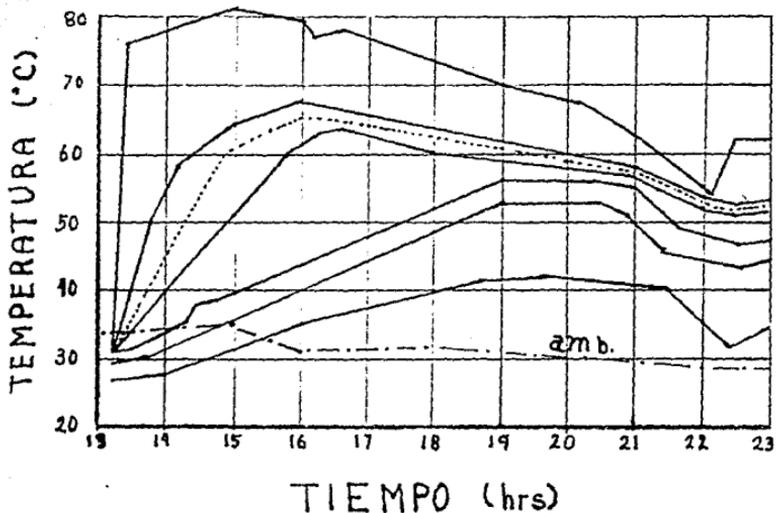


Figura 5.18. Variación de las temperaturas de las charolas.

La temperatura más baja es la de la charola más alta, la que debe perder calor por evaporación al ambiente.

Como se observa, la variación de las temperaturas de las charolas intermedias se conserva entre las temperaturas extremas, en todos los casos.

En las pruebas realizadas, se llegó a la conclusión, de que las fugas de vapor alrededor de los soportes de las charolas producen un rápido ascenso de las temperaturas en todas las charolas. El calentamiento de cada charola entonces, ya no obedece a la evaporación de la charola que está debajo de ella sino a la condensación del vapor proveniente de la charola de la base. Sin embargo, como atestiguan las pruebas, las charolas intermedias condensan más vapor mientras más cerca están de la charola de la base.

Alimentando agua proveniente de un sistema solar de calefacción a 92°C (si se dispone de él) al cambiador de calor, se obtienen temperaturas de 85°C en la charola de la base, con lo que se obtiene

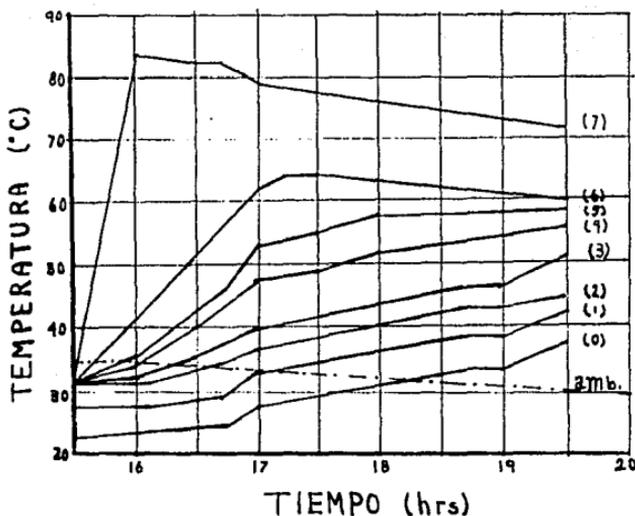


Figura 5.10. Variación de las temperaturas de las charolas.

un flujo de calor por evaporación de unos 40 a 50 kW, o aproximadamente 10 veces el flujo de calor estimado. Este flujo produce vapor que es prácticamente recuperado en las charolas superiores, pero que es mayoritariamente perdido al ambiente. Este efecto es más notable cuando la temperatura del agua de la charola de la base es mayor (comparar figuras 5.17 y 5.10).

La velocidad de respuesta de la temperatura, cuando hay variaciones en la temperatura de la charola de la base, se observa gráficamente en la figura 5.18. Al interrumpirse la operación de la bomba de recirculación del destilador, se suspendió la alimentación de calor a la charola de la base. Así, la temperatura de ésta acusa una caída muy clara, semejante a la variación asintótica con respecto a la temperatura del ambiente, hasta que se reinicia la operación de la bomba.

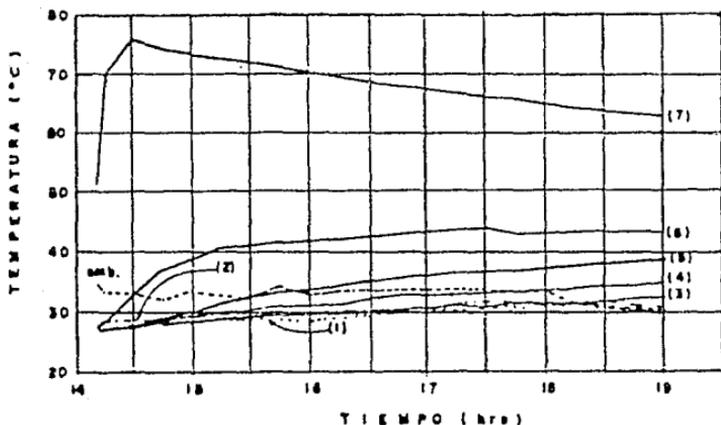


Figura 5.20. Variación de las temperaturas experimentales.

Nótese los abatimientos de las temperaturas de las otras charolas en ese periodo. Se observa que la respuesta es más rápida mientras más cerca está cada charola de la inferior.

Las temperaturas mínimas de cada charola se alcanzan después de recuperada la temperatura de la charola de la base, evidenciando la gran inercia térmica del sistema. Los tiempos característicos del aparato son del orden de horas, como lo indica la teoría.

El flujo de calor absorbido por el destilador, para la prueba correspondiente a la figura 5.18, se muestra en la figura 5.21. Al inicio de la operación, y mientras las temperaturas varían apreciablemente (de las 13:00 a las 16:00 hrs), la absorción de calor es de unos 15 kW en promedio.

Entre las 16:00 y las 18:00 baja gradualmente hasta poco menos de 10 kW, y se estabiliza en un valor de aproximadamente 9.5 kW después de esa hora. La figura 5.22 indica que ese fenómeno es repetible.

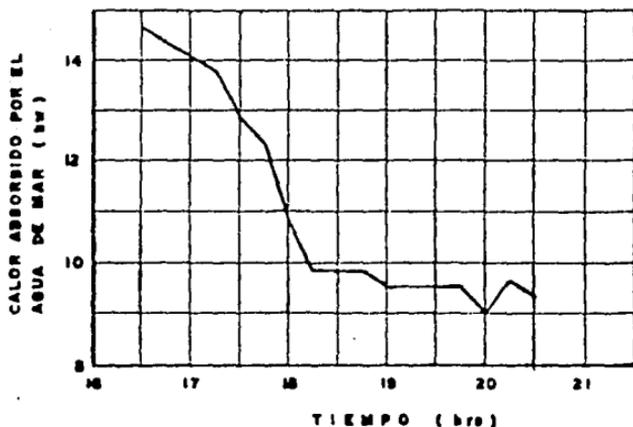


Figura 5.21. Calor suministrado al destilador por el cambiador.

Es interesante evaluar la capacidad de almacenaje térmico y de ganancia o cedencia de calor del almacén térmico. La figura 5.23 muestra una distribución clásica de la temperatura del tanque y de flujos de calor. La curva sólida representa la cantidad de calor que el sistema suministra al tanque. Este suministro crece hasta el mediodía y decrece después de esa hora.

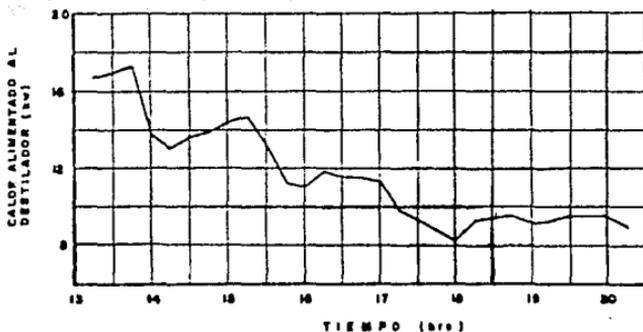


Figura 5.22. Calor suministrado al destilador.

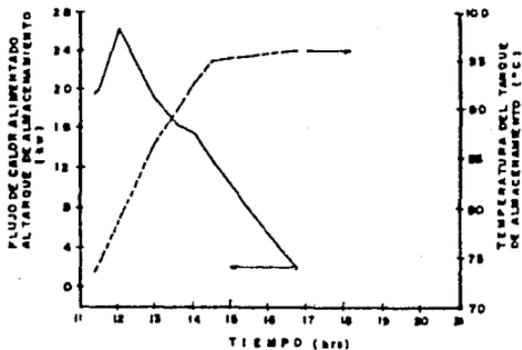


Figura 5.23. Características operativas típicas del tanque térmico.

5.0. PRODUCCION DEL CONDENSADO

La figura 5.24 muestra un gráfico de la producción de destilado en una prueba típica, para la primera charola productora de abajo hacia arriba.

En los primeros 30 minutos de prueba se obtienen, en general, unos 6 a 7 litros de destilado, lo que equivale a 280 - 330 litros por día, que se compara favorablemente con el valor estimado de 250 litros por día.

Cabe aclarar que uno de los aspectos operativos más importantes y menos estudiados, es cómo debe inyectarse agua nuevamente al destilador para rechazar la salmuera concentrada. El efecto sobre el comportamiento del destilador es bien claro, pues al suministrarse agua fría se produce un efecto de enfriamiento que compensa el de

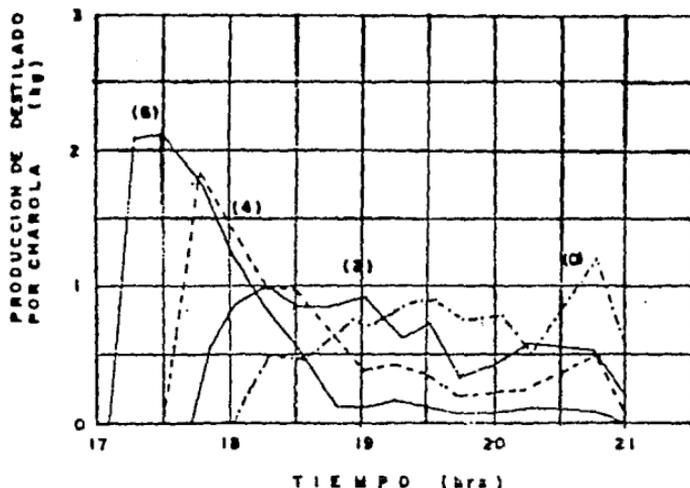


Figura 5.24. Producción instantánea de las charolas.

calentamiento en las charolas, y se revierte a los gradientes térmicos a condiciones similares a las del arranque. Así se evita el efecto de saturación citado, pero se pierde mucho calor en el rechazo, pues éste se extrae, de acuerdo con el diseño original del aparato, de la charola de la base.

Se ha pensado que tal vez sea más conveniente purgar el rechazo de la primera charola de destilación, o tal vez más arriba, o posiblemente convenga admitirlo no en la última charola sino más abajo. Sin embargo, estos trabajos implicarían modificaciones importantes en las características constructivas del destilador.

5.10. INCLINACION Y ORIENTACION DE LOS COLECTORES SOLARES

En su colocación ideal, la superficie plana del colector debería estar moviéndose continuamente sobre dos ejes para estar siempre perpendicular a los rayos del sol, tanto en diferentes horas del día como en los diferentes días del año; pero esto generalmente no se hace a causa de la complicación y dificultad que entrañaría el mover el colector con algún mecanismo automático, y normalmente es más fácil usar un colector fijo mayor, compensando con el tamaño la pérdida de intensidad de los rayos, y colocándolo en una posición intermedia según el itinerario medio de la radiación. En las latitudes más altas, las superficies verticales reciben más radiación en invierno que las horizontales.

5.11. CORRELACION DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES CON LA TEORIA

El trabajo experimental que hemos venido describiendo persigue tres fines adicionales: demostración, evaluación económica y de validación de las teorías. La demostración tiene como finalidad la de dar a conocer la bondad de este proceso con el fin de proporcionar posibilidad de uso de la energía solar para el consumo humano.

La evaluación económica tiene gran importancia, pues sólo conviene continuar proyectos de desarrollo que sean económicamente factibles.

En esta sección se hace una comparación de los resultados experimentales y los que, para condiciones de operación equivalentes,

se desprenden del modelo matemático. El propósito es dejar establecida la validez del modelo matemático para fines de análisis técnico y económico, así como para proyectos de mayor magnitud.

La validez del modelo matemático ha sido establecida para destiladores de caseta en ocasiones anteriores. Sin embargo, para el concepto de destilador de etapa múltiple que aquí interesa, no hay antecedentes de trabajos experimentales previos, y debe validarse el modelo con los experimentos propios.

El trabajo de validación de las ecuaciones de Dunkle bajo condiciones de flujo continuo en el agua, permiten suponer a priori que la producción de destilado del aparato bajo estudio será ligeramente más alta que la que predice ese modelo.

Multiplicando el valor de Q_{ec} en la ecuación 1 por 1.3, se pueden calcular las temperaturas de cada charola intermedia y compararlas con la nueva estimación teórica, formandose así la tabla 5.4.

Tábla 5.4. Comparación de temperaturas experimentales Vs. teóricas con un incremento de 30 % en la ecuación de Dunkle.

HORA	CHAROLA							COND.	
	BASE	6	5	4	3	2	1		
13:00	85.66	40.23	28.28	27.25	26.23	25.47	25.56	26.02	T
	R
14:00	86.52	72.08	47.77	29.88	26.88	25.52	25.56	27.22	T
	85.04	65.01	46.04	42.55	38.22	27.46	27.11	27.25	R
15:00	88.42	78.66	50.90	30.26	27.52	25.60	25.56	29.02	T
	82.87	68.57	61.17	57.08	50.08	32.80	31.05	29.23	R
16:00	81.70	78.54	62.58	47.44	31.86	28.00	25.57	30.00	T
	79.99	69.08	66.62	64.13	56.95	41.58	36.50	31.32	R

Observando los resultados de la tabla se revela que ahora el ajuste de la primera charola por encima de la charola base (charola No. 6) ha mejorado notablemente. Las diferencias en las estimaciones

de esta charola bajan de 3 a 4° C.

Las diferencias de las charolas intermedias, por ejemplo de la charola 4, bajan de unos 30 a 35° C a 12 a 20° C.

El factor de proporcionalidad se selecciona, por ahora, en forma arbitraria. Si por ejemplo se toma un factor de proporcionalidad de 0.15, puede construirse la tabla comparativa 5.5 que se indica a continuación:

Tabla 5.5. Datos de la tabla 5.4 Vs. estimaciones teóricas involucrando algunas fugas de vapor.

HORA	CHAROLA								COND.
	BASE	d	3	4	5	2	1		
14:00	80.52	71.30	46.80	24.85	23.15	32.37	32.23	27.22	T
	85.04	65.01	46.04	42.05	38.22	27.40	27.11	27.85	R
15:00	83.42	74.22	61.00	45.00	30.42	38.22	37.10	20.02	T
	82.87	68.57	61.17	57.08	50.68	33.80	31.05	20.23	R
16:00	81.70	74.77	65.88	54.84	46.01	43.01	40.75	30.00	T
	70.00	60.03	66.02	64.15	56.00	41.58	40.50	31.32	R

Producción estimada de destilado acumulada de 13:00 a 16:00 58 Kg.

Producción media: 50 Kg.

Por otro lado, en pruebas de campo posteriores a las reportadas, se continuó operando con agua de mar, y se corrigieron muy importantemente las fugas de vapor entre las charolas y el gabinete contenedor. Se obtuvo una operación satisfactoria alimentando, ya no las cantidades de calor que se usaban al principio (30 - 45 kW) sino

otras más apegadas a la especificación original (8 - 8 kW). Esto se logró operando solo una parte del campo solar, para lo cual se hicieron pruebas que solo empleaban el 25 y el 50 % de los captadores instalados, y se redujo el flujo de calor suministrado por el cambiador de calor.

Con todo, se logró que la producción aumentara a un mínimo de 90 kg de destilado cada 8 horas y, más importantemente, se atajó el efecto de "saturación" de las charolas, o como se ha indicado, la tendencia que tenía el aparato de aumentar la temperatura de todas las charolas hasta igualarlas y perder la capacidad de producción.

Con apoyo en los resultados experimentales obtenidos, se puede asegurar que el modelo matemático es capaz de reproducir adecuadamente el fenómeno bajo estudio con un error probable de 20 %.

Dentro de este margen, puede esperarse que el modelo permita la extrapolación de las características de operación, para este destilador y para otras más grandes o más chicos.

Consecuentemente la ecuación de Dunkle debe incrementarse por lo menos un 30 % si se desea dar cuenta del efecto de evaporación acelerada, en el caso de interés, que posiblemente se debe a la circulación forzada del agua en la charola de la base, a la vibración inducida por el recirculador o a una combinación de esos factores, y tal vez otros no identificados.

Nota:

La calidad de ajuste ha mejorado notablemente, pues ahora las diferencias de temperatura típicas entre lo estimado y lo real son del orden de 1 a 2° C, y las máximas de 10° C. La variación en la estimación del destilado acumulado ha mejorado también, de un error del 35 % a un error del 15 %.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

Es difícil establecer el costo del agua producto de un sistema en proceso de desarrollo como es la destilación solar. Algún observador ya apuntaba que si los hermanos Wright hubiesen condicionado su trabajo a la bondad de un análisis económico, nunca hubieran inventado el aeroplano. Más difícil es intentar la comparación económica con otro proceso más "convencional", de gran tradición y de costo subsidiado, como es la potabilización y conducción de agua dulce proveniente de acuíferos o de escurrimientos superficiales. Sin embargo, está claro que tratando de usar costos realistas y conservadores, se concluye que tanto los procesos convencionales como la destilación solar resultan en costos del agua producto muy similares, o al menos, del mismo orden de magnitud.

No sería extraño que, de analizar el costo real del agua conducida, resultara más cara que la destilada del agua de mar. Pero además de estas observaciones, técnicos de muchos países, a lo largo

del tiempo, han encontrado que la destilación del agua de mar es la mejor opción para asegurar el abasto a las poblaciones. No hace más de 30 años que en Estados Unidos se consideraba como la única forma de evitar las sequías intensas que amenazaban los emporios agrícolas.

Por consiguiente, desde el punto de vista económico, se desprende que la bondad de la desalación del agua de mar depende en gran medida de las fuentes de información y del esquema de subsidios con que se observe.

Una consideración adicional que se necesita hacer es la accesibilidad a la tecnología. Aún en plantas potabilizadoras, para estaciones de bombeo y para la perforación de pozos, no se requieren técnicas avanzadas y equipo sofisticado de importación, que a su vez requiera de técnicos altamente calificados.

Por otro lado, no puede conducirse agua de donde no se tiene en cantidad suficiente. De alguna manera debe atenderse al hecho de que en las ciudades existen varias empresas privadas que venden agua purificada, y cobran de 20 a 250 pesos el litro. En suma, este somero análisis indica que la destilación solar de agua de mar en muchas regiones puede ser, a un tiempo, la única opción y la más económica.

Las 4 décadas anteriores pueden ser divididas en tres fases en relación con los procesos de desalación, haciéndose un pequeño resumen de los potenciales mundiales en la tabla 1:

- Los años 50's que fue una época de descubrimientos;
- Los 60's donde la preocupación fue la investigación;
- Los 70's y los 80's fueron épocas de comercialización.

En 1970, la industria evaluó la posibilidad de comercialización de la desalación y la aplicación de los diversos procesos. No obstante, en los Estados Unidos se continuó siendo autosuficiente en:

- Procesos de destilación (multietapa rápida, destilación por múltiple efecto y compresión de vapor;
- electrodialisis (electrodialisis y electrodialisis inversa); y
- ósmosis inversa (mediante membranas espirales enrolladas y membranas de fibra hueca).

TABLA 1
DISTRIBUCION DE LA CAPACIDAD DE DESTILACION MUNDIAL

REGION	PORCENTAJE
Oeste de asia.	63
Norteamérica.	11
Norte de Africa.	7
Europa.	7
Pacífico.	4
Caribe.	2
URSS.	2
Otros.	4

Otros procesos también fueron explorados pero no se les dió la misma comercialización; tales fueron los casos de la congelación y la destilación solar.

En las islas, posesión de los Estados Unidos, la destilación es la tecnología más empleada, sobre todo en los procesos de ósmosis inversa y electrodiálisis inversa. Como se muestra en la tabla 2, los procesos más empleados en los Estados Unidos y en otros países son completamente diferentes, reflejandose así las numerosas técnicas aplicables en la desalación del agua de mar.

TABLA 2
DISTRIBUCION DE LA CAPACIDAD DE DESALACION POR PROCESOS

PROCESO DE DESALACION	PORCENTAJE	
	ESTADOS UNIDOS	RESTO DEL MUNDO
Destilación	21	70
Electrodiálisis	6	5
Osmosis Inversa	73	25

TABLA 3
ORDEN DE IMPORTANCIA EN EL USO DE LOS PROCESOS
DE DESALACION EN EL MUNDO

PROCESO DE DESTILACION	PORCENTAJE
Destilación	3
Electrodialisis	13
Osmosis inversa	32
Total	11

Después de los puntos comentados podemos proporcionar algunas conclusiones importantes:

6.1.1. ACERCA DE LAS OBRAS DE TOMA:

En lo que se refiere al sistema de captación podemos concluir lo siguiente:

- a) Debe proporcionar agua de una composición química determinada, sin sobrepasar ciertos límites de concentración, ni presentar componentes "extraños".
- b) El agua obtenida debe estar libre de materia en suspensión.
- c) La obra debe estar lo más cercana posible a la planta desaladora.
- d) El suministro de agua debe ser ininterrumpido.

La selección del equipo a emplear depende de la altura del nivel de agua al punto de instalación de la bomba, de la disponibilidad de energía eléctrica, de la cantidad de sólidos en suspensión existentes en el agua, de la distancia entre el punto de toma y tierra firme, etc. Generalmente se prefieren, por su simplicidad, confiabilidad y bajo mantenimiento, las bombas centrífugas horizontales accionadas por motor eléctrico.

Para el manejo de salmuera concentrada y caliente se emplean bombas centrífugas o de turbina vertical.

Los sistemas de destilación, desde el punto de vista químico, se enfrentan a dos tipos de problemas, que son la formación de incrustaciones de ciertas sales en las áreas de transferencia de

calor y la corrosión en todos los puntos del sistema originadas por las condiciones de salinidad, pH, humedad, presencia de ciertos gases y formación de elementos galvánicos. Estos problemas se evitan mediante el empleo de materiales resistentes a la corrosión, mediante el control de la temperatura y concentración de salmuera, y tratamientos químicos que disminuyen el grado de dureza del agua.

Para evitar los problemas referentes a las tomas de agua:

Los puntos de toma deberán localizarse en lugares en que se tenga adecuada profundidad, fondo rocoso, poco oleaje, corrientes de renovación, lo más cercano posible a la playa y a la planta desaladora. Cuando no ha sido posible el logro de todas estas condiciones, se ha requerido de la instalación de largas líneas de conducción, filtros, construcción de sifones, sedimentadores, tanques de almacenamiento, etc.

Los puntos marcados anteriormente deben ser cumplidos mediante los diversos sistemas de captación mencionados en el capítulo correspondiente.

6.1.2. ACERCA DE LOS SISTEMAS DE DESALACION:

Los costos de desalación empleando la destilación solar, son considerablemente más bajos que los de la destilación con membranas, teniendo éstas últimas la desventaja de que las bombas, los sistemas para pretratamiento y postratamiento y los factores de mantenimiento, resultan ser un problema que se vería acentuado en el caso de México, ya que por el momento, toda tecnología es de importación, un factor que incrementaría notablemente el valor del agua, sobre todo que se desea proporcionar de ésta a pequeñas ciudades y a comunidades pesqueras.

La destilación solar tiene ciertas ventajas económicas sobre otros procesos de destilación para la desalación de agua, esto es debido al uso gratuito de la energía solar y a los bajos costos de operación y mantenimiento, aunado a que su construcción es muy sencilla.

Algunos de los principales factores que afectan al costo de un proyecto de desalación empleando tecnologías de membrana son:

- Tipo, tamaño y localización de la planta de desalación;
- Fuente, calidad y temperatura del agua cruda en la alimentación y el grado de pretratamiento requerido;
- Calidad del agua desalada y el grado permisible de tratamiento;
- Almacenamiento del agua producto;
- Factor de carga anual de la planta;
- Desarrollo del uso del suelo del lugar;
- Costo de material para construcción y mantenimiento;
- Costo de operación;
- Costos de los reactivos químicos;
- Costo de la energía;
- Costo de la disposición del desecho concentrado;
- Costo de reemplazo de membranas de electrodiálisis inversa;
- Requerimiento de fianzas, seguros y garantía;
- Costos de financiamiento; y
- Competencia entre proveedores.

Ambos costos, inversión inicial y operación y mantenimiento deben ser evaluados para sistemas de tratamiento con membranas, ya que frecuentemente los costos de operación y mantenimiento exceden los de amortización de inversión inicial.

Un estudio reciente hecho por la oficina de asesoramiento tecnológico del congreso de los Estados Unidos, revisó el costo de la desalación del agua salobre y del agua de mar con tecnologías actuales, y los resultados obtenidos se ilustran en las figuras 6.1 y 6.2, en las que se observa que el costo fue decreciendo como resultado de los avances tecnológicos y las demandas del mercado. La mejoría en la calidad de las membranas, tiene que responder al cambio tecnológico, especialmente en los procesos de ósmosis inversa. Un alto nivel de competencia de la industria nacional e internacional puede jugar un rol significativo, incluyendo los precios del capital de equipamiento.

La tabla 4 ilustra la distribución del costo total incluyendo el capital recuperado por la operación de una planta de desalación, pudiéndose observar que la energía, las membranas y el trabajo, representan los costos más significativos.

En la figura 6.2, los costos de destilación y ósmosis inversa,

incluyen capital y costos de operación, y fueron obtenidos de plantas con una producción de 3,700 a 18,000 m³/día (1.5 mgd) de agua potable.

Los costos pueden ser más altos de lo que se indica cuando el equipo de desalación es operado ineficientemente. El incremento en los costos de destilación durante los inicios de los años 70's refleja una elevación en los costos de la energía. Todos los costos son tomados en dólares de 1985.

TABLA 4
DISTRIBUCION DEL COSTO* TOTAL POR OPERACION PARA DESALACION DE AGUA

CATEGORIA DEL COSTO	PORCENTAJE DEL COSTO TOTAL	
	ELECTRODIALISIS	OSMOSIS INVERSA
Recuperación del capital.	58	41
Membranas.	4	12
Energía.	20	26
Trabajo.	12	11
Químicos.	1	7
Otras ampliaciones.	5	3

* Los costos están calculados en base a 3,800 m³/día con desalación de 2,000 mg SDT/L para electrodiálisis.

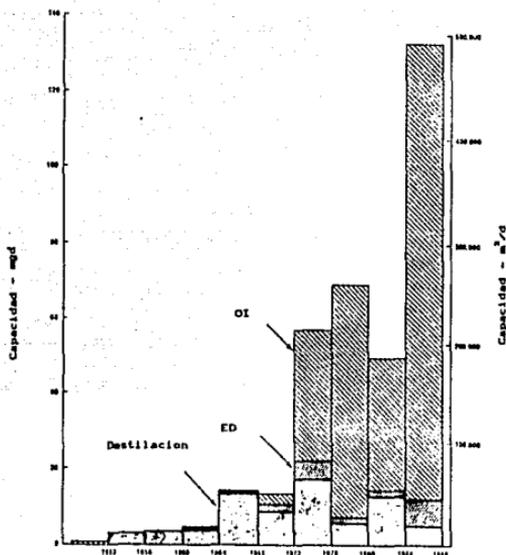


Figura 6.1. Capacidad de desalación acumulada para los Estados Unidos entre 1952 y 1988.

6.1.3. ACERCA DEL DISEÑO DE UNA PLANTA DE DESTILACION:

Las conclusiones más destacadas son:

- a) Es posible diseñar un destilador solar de difusión, a presión atmosférica, con reuso de calor y con base en un modelo matemático.
- b) El modelo matemático adecuado es el propuesto por Dunkle y Cooper, pero para dar cuenta de la evaporación acelerada debida a la circulación forzada de agua y a vibraciones que ésta induce debe aumentarse la tasa de destilación en un 30 %, ésto es, hay que multiplicar el término Q_{ec} por 1.3.

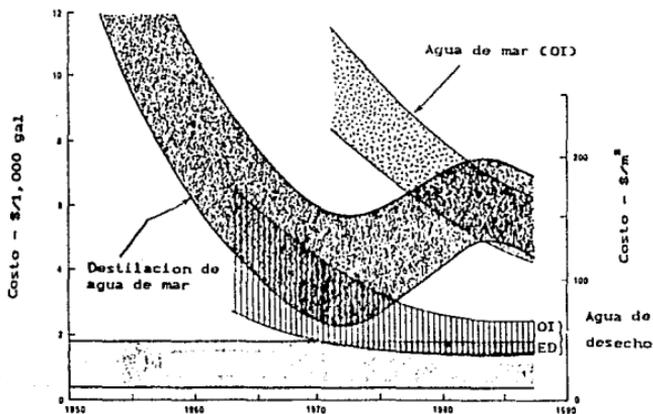


Figura 8.2. Rango de costos de desalinización de 1950 a 1987.

- c) El destilador solar construido con esa base es de muy sencilla operación y, en la experiencia operativa de un par de meses, requiere un mínimo de mantenimiento, reduciéndose éste a la limpieza de los vidrios de los captadores y del fondo de las charolas destiladoras.
- d) La producción de agua destilada, en condiciones normales de operación, es de unos 75 a 90 litros por cada 8 horas de operación para la unidad destiladora probada. Esta producción se obtiene con una aportación de calor del sistema de calentadores solares del orden del 25 al 50 % del campo instalado. Así, puede esperarse una producción total de destilado del orden de 330 a 910 litros diarios con las tres unidades destiladoras del diseño.

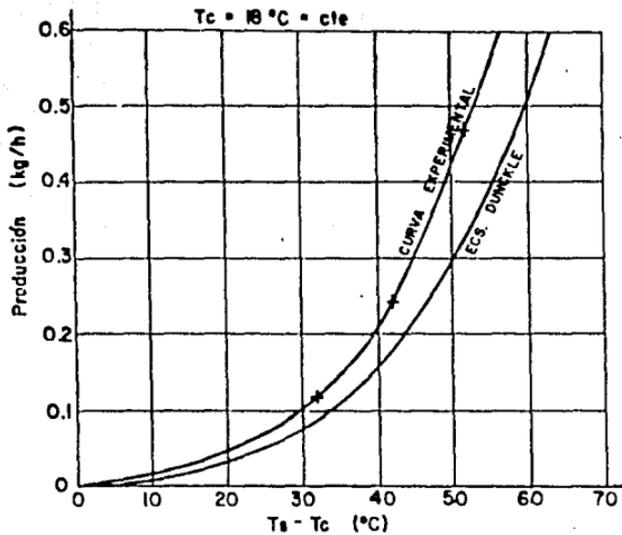


Figura 6.3. Comparación de los resultados experimentales con los obtenidos empleando la ecuación de Dunckle.

e) Los costos del agua destilada en el prototipo, extrapolados para una vida útil de unos 15 años, resultarían de unos 2,000 a 3,000 pesos de septiembre de 1987 por m³. El agua potable de ahí obtenida, mezclando el destilado con un 25 a 30 % del agua de mar, daría un costo del agua potable proporcionalmente reducido.

f) Las características constructivas, operativas y de costo del destilador desarrollado hacen de éste una proposición viable en lo técnico y en lo económico. La ventaja adicional es que el total de materiales y equipos es nacional, y más aún local, haciendo posible la expectativa de que permita la construcción local a nivel artesanal del destilador desarrollado.

Desde el punto de vista político, la energía solar se considera como sigue:

1. En muchos países las industrias productoras de energía están nacionalizadas.
2. La energía es tema de conversación de los diferentes Departamentos de Asuntos Exteriores, especialmente desde el conflicto Árabe-Israelí de 1973 y el consiguiente aumento del precio del petróleo.
3. La energía es la principal fuente de gastos e ingresos de un país.
4. La energía es fundamental, tanto para las actividades industriales como domésticas, y cualquier decisión puede tener importantes repercusiones.
5. La crisis energética ha puesto de manifiesto lo peligroso que puede ser en un momento dado, depender de una fuente energética procedente de otro país. De aquí que todos los países intenten en la actualidad, conseguir su independencia energética. El uso de la energía solar, junto con el empleo de toda una serie de fuentes renovables (energía procedente

de las mareas, del viento, geotérmica, hidráulica, etc.), puede aumentar el grado de autosuficiencia en el suministro de energía y hacer que el país sea menos vulnerable a las influencias políticas exteriores.

6. Para la implantación de la energía solar será necesaria una adecuada política financiera, en la que deben trabajar diferentes departamentos gubernamentales. Entre otras cosas, el Estado deberá ayudar o promover el desarrollo de las distintas aplicaciones de la energía solar. Ello ha sido comprendido por gobiernos como los Estados Unidos, Japón, Francia, Australia, etc., que están dedicando un gran esfuerzo al estudio de esta fuente energética.

Adicionalmente podemos complementar con las siguientes reglas:

La obtención de agua fresca mediante desalación, como cualquier otro proceso industrial, basa su éxito en el acierto de la selección del proceso y equipo a emplear, así como la adecuada operación y mantenimiento del mismo.

El uso de destiladores solares puede ayudar a mejorar las condiciones de vida, factor fundamental para propiciar mejores y más organizados asentamientos humanos.

El destilador solar no es contaminante ambiental debido a que no utiliza combustibles convencionales para efectuar la evaporación y sólo aprovecha la energía radiante del sol.

6.2. RECOMENDACIONES

De las experiencias acumuladas se pueden mencionar las recomendaciones que ahora se anotan:

- a) Con el fin de identificar políticas óptimas de operación, específicamente en cuanto a la dosificación del rechazo, se recomienda extender los periodos de ensaye de los proyectos mínimo seis meses.

- b) Deberá evitarse la formación de carbonato de zinc en el fondo de las charolas, ya que este polvo blanco impide el libre escurrimiento del condensado, previniéndose posibles problemas de corrosión, se recomienda el empleo de otros materiales para la construcción de éstas; el acero inoxidable 304 parece una buena selección.
- c) Considerando las limitaciones en cuanto al suministro de agua de mar en el prototipo, y para poder suministrar agua de rechazo a la temperatura y en las cantidades necesarias, es conveniente planear la construcción e instalación de un destilador como el desarrollado, aunque seguramente de más capacidad (del orden de 10,000 litros/día) en un sitio cercano al mar.
- d) Ya que el aparato desarrollado ha probado su confiabilidad, y dado que las expectativas técnicas y económicas se han satisfecho, se recomienda en gran medida la operación e instalación suministrando agua a una comunidad necesitada. La siguiente etapa de este trabajo sería la detección de sitios posibles para la posterior instalación de esta tecnología, para el beneficio de localidades, sobre todo, pequeñas.

Dado que todos los sistemas se localizan en lugares de muy difícil acceso, lejanía y mal estado de los caminos o por su condición de aislamiento, en el caso de las islas, la comunicación por radio debe verse complementada por un servicio de transportación rápido, eficiente y adecuado a las condiciones del medio, por lo que se hace uso además de vehículos, de barco y lanchas asignados permanentemente a la unidad regional.

El personal de las plantas desaladoras deben tener conocimientos básicos de mecánica automotriz, electricidad, soldadura, plomería, química y administración.

Un aspecto importante para lograr el buen funcionamiento de un sistema de desalación, es contar con la obra civil adecuada para la instalación.

Por parte de los destiladores solares, sea cualfuere su diseño,

deben estar herméticamente cerrados, por que ello evita las fugas de vapor que causan pérdidas de calor y de agua evaporada. Los diferentes diseños de destiladores tienen una sola finalidad: lograr una gran absorción de la radiación solar, ya que al alcanzar altas temperaturas de agua se obtiene una mayor cantidad de destilado.

Las superficies de condensación deben mantenerse lo más cerca posible de la superficie del agua, con el propósito de evitar la convección interna, disminuyendo así su eficiencia.

El agua salada deberá tener movimiento constante dentro del destilador, ya que de lo contrario se producen incrustaciones de sal que obstruyen las conexiones de entrada y salida de ésta. Las incrustaciones se eliminan limpiando las charolas y las conexiones con una solución de agua y ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, en proporciones de 1 ml de ácido por 1 lt. de agua. Para poder realizar la limpieza del destilador, éste se instalará de forma tal que se facilite su limpieza manual cuando estén sucias las conexiones o las charolas.

El destilador solar funciona mejor instalado en zonas de buena insolación, o en lugares con muchas horas de insolación o con días claros y calurosos. Para que funcione mejor, el destilador debe ser orientado de manera que siempre logre captar la luz del sol, y si se instala inclinado, debe ser tal, que reciba siempre la luz del sol lo mejor posible. Esto será de acuerdo a la trayectoria del sol y a la latitud del lugar donde estará instalado.

BIBLIOGRAFIA:

1. Curso Teórico Práctico Sobre Desalación.
Ed. Instituto SEDUE, 1980.
2. Atlas Solar de México.
Everardo Hernandez H.
Adalberto Tejeda M.
Ed. Facultad de Arquitectura, Universidad de Colima.
3. Diseño y Construcción de un Destilador Solar de Agua de Mar para La Paz, B. C. S.
M. I. Filiberto Gutierrez.
D. R. Jose Luis Fernandez.
Ed. Instituto de Ingeniería, UNAM, 1987.
4. Energía, Medio Ambiente y Edificación.
Philip Steadman.
Ed. H. Blume Ediciones.
Madrid, 1982.
5. Energía Solar.
Julia Gonzalez Hurtado.
Ed. Alhambra.
6. Sea Water Desalination.
Water Re-use Promotion Center,
Tokyo, Japan, 1980.
7. Energía Solar. Cartilla No. 4. Destilación Solar.
Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas.
Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar (DIGAASES. Actualmente Instituto SEDUE).
8. Journal. Membrane technology. (Revista)
American Water Works Association.
Número 11, volumen 81, Noviembre 1980
Páginas 30 a 42.