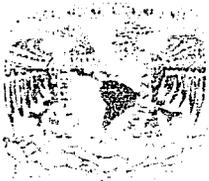


01127
1



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

***Aprovechamiento de la energía solar en una planta
desalinizadora de agua de mar de ósmosis inversa***

T e s i s
Que para obtener el título de
Ing. Mecánico

Presenta
Juan Agüero Espino

Director de tesis: M en I Felipe Muñoz
Gutiérrez



México, D.F.

2003

A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo, reservando:
NOMBRE: Ángelo Sánchez
FECHA: 5 de Mayo de 2003
FIRMA: [Firma]

A mi madre, Ana María, por todo su apoyo y esfuerzo, durante todos estos años, sin los cuales no hubiera llegado hasta el fin, por eso toda mi admiración, respeto y cariño.

A mi padre, Francisco por su apoyo y sus consejos.

A mis hermanos, Diana, Francisco y especialmente a Norma, por su cariño, apoyo y consejos.

A todos mis amigos que compartieron conmigo triunfos y derrotas, entre otras tantas cosas, en especial a Omar, Germán, Edmundo, Bernardo, Rafael, Zulum y Karla.

A la UNAM, por dejarme ser parte de una de las instituciones más grandes de este país y por la formación recibida.

A la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería por los profesores que son parte fundamental de mi formación.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. EL AGUA

CAPÍTULO 2. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN

Procesos Térmicos o con cambio de fase:

Evaporación de Múltiple Efecto (EME).

Evaporación Súbita de Múltiple Etapa (ESME).

Compresión de Vapor (CV).

Evaporadores Solares.

Procesos de Membrana:

Ósmosis Inversa (OI).

Electrodialisis (ED).

Otros Procesos.

Impacto Ambiental.

CAPÍTULO 3. ÓSMOSIS INVERSA

CAPÍTULO 4. CELDAS FOTOVOLTAICAS

Energía Solar.

Celdas Fotovoltaicas.

CAPÍTULO 5. PLANTA PROPUESTA

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

ANEXO

BIBLIOGRAFÍA

CAPÍTULO 1

EL AGUA

En la actualidad uno de los problemas más graves a los que se enfrenta la humanidad es la escasez de agua, esto se debe principalmente a que las fuentes de agua naturales de donde se extrae están contaminadas a gran escala y a una explosión demográfica desmedida. Esto ha traído como consecuencia que se busquen fuentes de agua no convencionales (como lo son el mar y las aguas residuales) para satisfacer la creciente demanda de agua potable.

Como es bien sabido el agua es el elemento fundamental de la vida pues sin ella no existiría ya que regula las condiciones físicas, químicas y biológicas que existen en la superficie terrestre y su presencia se percibe en tres fases, vapor o agua atmosférica, la cual al condensar se precipita en forma de lluvia; en fase líquida o agua terrestre, que puede dividirse en superficial y subterránea; y finalmente en fase sólida o hielo de los glaciares. En otras palabras estamos rodeados de ella y de hecho cubre tres cuartos de la superficie terrestre.

En cuanto a cifras se refiere la Tierra tiene 1,360 millones de km^3 de agua, de los cuales el 97.5% es agua de mar y del restante 2.5% alrededor de 0.6-0.7% son aguas continentales y subterráneas, siendo sólo el 0.014% la disponible en ríos y lagos, y el 1.8-1.9% del agua en el mundo se encuentra congelada en los glaciares (Arreguin, et al., 1998)

El agua se clasifica en dulce y salobre, lo cual se determina por la cantidad de sólidos disueltos que se encuentran en ella determinando también su uso y dependiendo la región del planeta; se considera que para uso humano el agua no debe de contener más de 500 a 1,000 ppm de sólidos disueltos totales (SDT), aunque existen lugares donde aceptan 3,000 ó 4,000 ppm de SDT. Por otra parte la cantidad mínima de agua para una adecuada calidad de vida que requiere el ser humano por día es de 1.1 m^3 y de 500 m^3

por año. Pero estas cantidades varían según la región ya que la disponibilidad del agua depende en gran medida del clima que ésta tenga (Arreguin, et al., 1998).

En México, según la Comisión Nacional del Agua (CNA), la disponibilidad natural media por habitante es de 4,841 m³/año. Siguiendo con los datos que proporciona la CNA, y teniendo muy presente que la distribución del agua no es uniforme ni en espacio ni en tiempo, se encuentran en nuestro país regiones cuya precipitación media alcanza los 2,258 mm, como es el caso de la región de la Frontera Sur, y en cambio, en la Península de Baja California es de 199 mm, con lo que se concluye que el norte del país cuenta con un clima árido. En cuanto a la distribución del agua en el tiempo se tiene que la mayoría de las precipitaciones pluviales ocurren principalmente en el verano. Para observar lo anterior se presenta la siguiente tabla.

Región administrativa	Precipitación media histórica (1941-2000) (mm)	Disponibilidad natural base media (hm ³)	Disponibilidad natural base media per-cápita (población 2000) (m ³ /hab)	Escorrentamiento superficial virgen medio (hm ³)*	Recarga media de acuíferos (hm ³)	Extracción total bruta de agua (2000) (hm ³)
I Península de Baja California	199	4 425	1 610	3 012 (a)	1 413	3 836
II Noreste	476	7 950	3 398	5 459	2 491	6 028
III Pacífico Norte	684	24 474	6 311	21 933	2 541	9 224
IV Balsas	806	28 191	2 844	24 273	3 918	7 730
V Pacífico Sur	1 125	33 133	8 334	31 468	1 665	1 557
VI Río Bravo	449	14 261	1 512	9 204	5 057	8 010
VII Cuencas Centrales del Norte	496	6 802	1 791	4 729	2 073	4 172
VIII Lerma – Santiago – Pacífico	671	39 479	2 084	32 370	7 109	14 514
IX Golfo Norte	917	24 339	5 123	23 071	1 268	5 217
X Golfo Centro	1 549	102 633	11 136	98 930	3 703	3 946
XI Frontera Sur	2 258	155 906	26 791	139 004 (b)	16 902	1 841
XII Península de Yucatán	1 290	26 496	8 146	1 348	25 148	1 307
XIII Valle de México	797	3 802	196	1 996 (c)	1 806	4 801
Nacional	772	471 891	4 841	396 797	75 094	72 183

Los volúmenes de extracción total bruta de agua son estimados.

(a) Incluye 1 850 hm³ provenientes del Río Colorado.

(b) Incluye aproximadamente 50 000 hm³ provenientes de Guatemala.

(c) Se consideran aguas residuales de la Ciudad de México.

* Datos preliminares.

Disponibilidad natural base media = escorrentamiento superficial virgen medio + recarga de acuíferos.

Disponibilidad natural base per-cápita = (escorrentamiento virgen medio + recarga media de acuíferos) / habitantes en el 2000

Tabla 1.1 Disponibilidad y Usos del Agua por Región Administrativa, para fines de planeación.

Fuente: Compendio Básico del agua en México. CNA, México, 2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

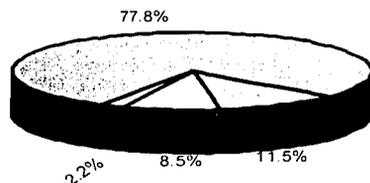
Por otro lado, dentro de los usos del agua, el sector que más agua demanda es el agrícola con un 80% del total de agua extraída a nivel mundial, en México se estimó para el 2000 que el 77.8% del agua es para riego de cultivos, 11.5% para abastecer de agua a las poblaciones, 8.5% para la industria y 2.2% para uso pecuario. Con un total estimado de 72.2 km³ de agua para ese año. La siguiente tabla muestra esta distribución y de donde se extrae el agua para tales usos.

Uso	Origen		Volumen Total (km ³)	Porcentaje de la extracción
	Superficial (km ³)	Subterráneo (km ³)		
Agrícola*	37.0	19.2	56.2	77.8
Público Urbano	2.6	5.7	8.3	11.5
Industrial **	2.5	3.6	6.1	8.5
Pecuario	1.6	0.0	1.6	2.2
Total	43.7	28.5	72.2	100.0

Además se evaporan 9 km³ de agua al año en las principales presas y lagos del país.

* El volumen de extracción del agua para Distritos de Riego en el período 1999-2000 fue de 27.829 km³.

** Incluye industria autoabastecida, industria conectada a la red y termoeléctricas, excepto la de Petacalco y Dos Bocas.



Agrícola
 Público Urbano
 Industrial
 Pecuario

Tabla 1.2 Usos Consuntivos del Agua

(Datos estimados para el 2000)

Fuente: Compendio Básico del Agua en México, CNA, México, 2002.

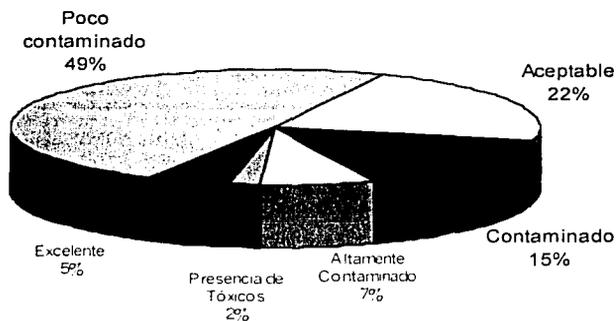
A estos datos también hay que añadir 143.3 km³ de agua que fue el volumen concesionado a diciembre del 2000 para uso en hidroeléctricas, las cuales generaron 32.624 GWh en el año 2000, lo que representó el 17% del total de la energía eléctrica generada en el país, pero su capacidad instalada es de 9,390 MW, es decir 26% del total. Para el uso público urbano se tiene que el 71% del agua es para uso en casas habitación, el 12% en industria, 15% en comercio y 2% en el sector servicios.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los principales problemas que se enfrentan al momento de abastecer agua en los centros urbanos son el agotamiento de las fuentes locales, la contaminación de las mismas y los altos costo de captación y conducción del agua. Pero lo peor es que ocurren grandes porcentajes de fugas, entre un 30-40%, debido principalmente al uso de tecnología derrochadora, no se tiene una cultura de "reuso", deficiencias en la facturación y cobranza, tarifas que no cubren los costos de suministro y el mayor problema es que la ciudadanía no tiene educación ni conciencia sobre el agua.

El problema de la contaminación toma mayor impacto ya que prácticamente no hay actividad humana que no contamine los cuerpos de agua, en cuanto a la contaminación por procesos industriales es variada y poco controlada y llega a tener efectos muy tóxicos aún cuando la descarga sea en pequeñas cantidades; a esto se tiene que agregar que los sistemas de tratamiento son insuficientes o nulos, y una vez tratada el agua se tiene el problema de qué hacer con los lodos que se producen, los cuales o son tirados a cielo abierto o peor aún devueltos al sistema de alcantarillado y en muy pocas ocasiones son tratados adecuadamente. El gráfico siguiente, tomado del *Compendio Básico del Agua en México de la CNA*, muestra la situación de la calidad de las aguas superficiales, donde se observa que un 24% de dichos cuerpos están contaminados y no tienen ningún uso directo, esto implica que casi un cuarto del agua ya no tiene ninguna utilidad.

Distribución Porcentual de la Calidad del Agua en 535
Cuerpos Superficiales



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Calidad del agua	Cuerpos de Agua %	Usos
Excelente	5	Todo uso
Aceptable	22	Agua potable con tratamiento convencional.
Poco Contaminado	49	Agua potable con tratamiento avanzado
Contaminado	15	Prácticamente ningún uso directo
Altamente Contaminado	7	Prácticamente ningún uso directo
Presencia de tóxicos	2	Prácticamente ningún uso directo

Tabla 1.3 Calidad de las Aguas Superficiales Nacionales

(Situación al 2000)

Fuente: Compendio Básico del Agua en México, CNA, México, 2002

La CNA menciona que las cuencas con mayor grado de contaminación son: Lerma, Alto Balsas, Blanco y San Juan (N. L.). En cuanto a aguas residuales los centros urbanos generan 7.8 km³/año (250 m³/s) de los cuales 6.3 km³/año (200 m³/s) se recolectan por alcantarillado y por su parte la industria genera 5.36 km³/año (170 m³/s) cuyos giros industriales que más contaminan los cuerpos receptores son:

Industria	Caudal de aguas residuales (m ³ /s)	Materia orgánica generada* (miles ton/año)
Azucarera	45.6	1 869
Química	13.4	635
Petrolera	7.0	1 247
Hierro y Acero	4.5	93
Celulosa y Papel	4.5	85
Textil	2.9	196
Beneficio del Café	1.5	80
Cerveza y Malta	1.4	95
Alimenticia	1.2	39
Agropecuaria	0.7	33
Acabado de Metales	0.2	1.7
Curtiduría	0.1	13.3
Vitivinicola	0.1	5.3

*Medida en términos de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

Tabla 1.4 Caudal descargado por diferentes tipos de industria

(Datos para el 2000)

Fuente: Compendio Básico del Agua en México, CNA, México, 2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

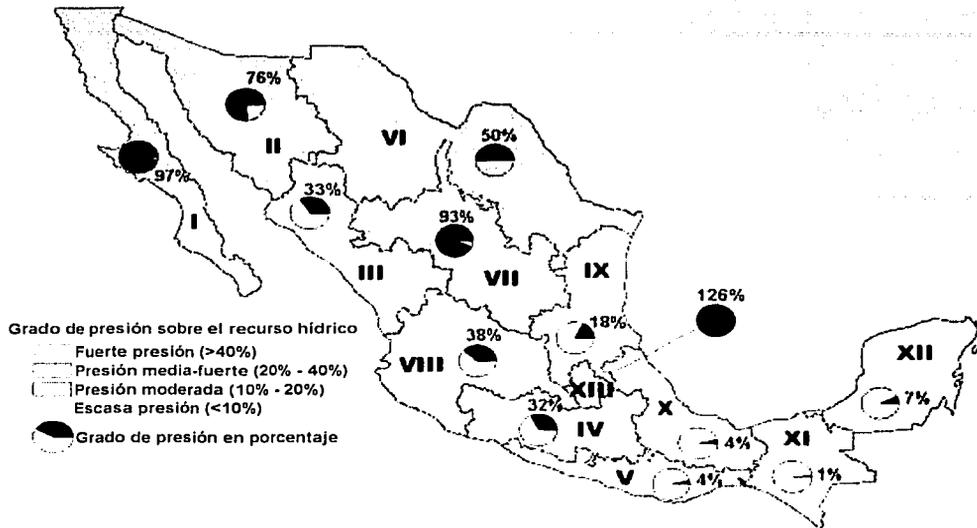


Figura 1.1 Grado de presión sobre el recurso hídrico. ^a

^a Estimaciones realizadas por la GPII, con base a la disponibilidad y extracciones de agua, considerando el procedimiento de evaluación que marca la Comisión para el Desarrollo Sustentable de la ONU en su publicación: Evaluación General de los Recursos de Agua Dulce del Mundo 1997.

Grado de Presión sobre el recurso hídrico = Extracción Total Anual / Disponibilidad Natural Base Media.

Fuente: Compendio Básico del Agua en México, CNA, México, 2002.

Observando el mapa de la CNA es evidente que la zona crítica en el país es todo el norte, en especial las regiones administrativas de Península de Baja California, Noreste, Río Bravo y Cuencas centrales del Norte las cuales incluyen a los estados de Baja California, Baja California Sur y Sonora que paradójicamente son estados que limitan con el mar, por lo que el uso de procesos de desalinización de agua de mar puede ser la solución para satisfacer el abastecimiento de agua como lo son en países del Medio Oriente que dependen de estos procesos para la obtención de agua potable y de hecho son los que mayor experiencia tiene en la operación y mantenimiento de plantas desalinizadoras, principalmente aquellas que utilizan el proceso de evaporación súbita de múltiple etapa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por lo tanto, la desalinización de agua salobre o de mar es una opción real que se ha convertido en un método confiable para el suministro de agua potable y que se ha venido practicando exitosamente por décadas en muchos países del mundo, produciendo agua para consumo humano o procesos industriales evidenciando que es factible económica y técnicamente posible. En México existen plantas desalinizadoras de las cuales el sector turismo es el que tiene la mayor capacidad instalada, a continuación se muestra un gráfico con esta información y los estados en los que se encuentran dichas plantas.

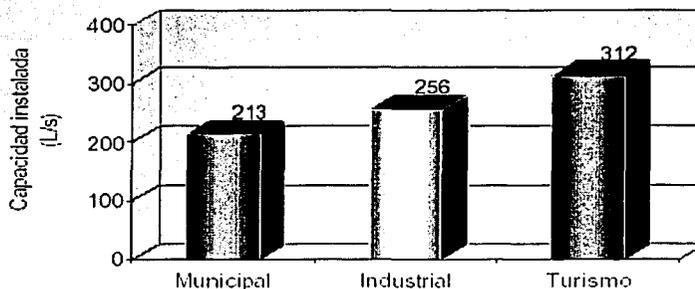


Figura 1.2 Capacidad instalada en plantas desalinizadoras en México, 2001

Entidad Federativa	No. total de plantas	Plantas en operación	Plantas fuera de operación	Capacidad instalada (L/s)	Capacidad que opera (L/S)
Baja California	10	7	3	110	93
Baja California Sur	38	32	6	104	39
Campeche	2	2	0	36	25
Coahuila	7	2	5	1	0
Durango	24	9	15	8	4
Guerrero	4	2	2	23	10
Nuevo León	2	2	0	4	4
Oaxaca	1	1	0	156	156
Quintana Roo	76	57	19	313	269
San Luis Potosí	1	1	0	1	0
Sonora	5	4	1	5	1
Tamaulipas	1	1	0	20	4
Total	171	120	51	781	605

Tabla 5.1 Plantas desalinizadoras en México, 2001

Fuente: Estudio realizado por GEDHI, citado en Estadísticas del agua en México, Ed. 2003, CNA.

De la tabla anterior se puede observar que la mayoría de las plantas se encuentran en el norte del país, con excepción de Quintana Roo que cuenta con 76 plantas. Debido a la capacidad de las mismas se puede inferir que dichas plantas sean de procesos que utilizan membranas o instalaciones con destiladores solares. Los procesos de membrana pueden ser de ósmosis inversa o electrodiálisis, y el tipo de proceso lo determina la calidad del agua de alimentación.

Para concluir, los procesos desalinizadores son de dos tipos los de destilación y de membranas, cuyas tecnologías más usadas, y que están en etapa comercial, son: tecnología de Evaporación Múltiple Efecto (EME), de Evaporación Súbita Múltiple Etapa (ESME) y de Compresión de Vapor (CV), para los procesos de destilación; y los procesos de membranas son: Ósmosis Inversa (OI) y Electrodiálisis (ED). Los procesos desalinizadores han evolucionado para convertirse de procesos costosos con grandes requerimientos de energía a procesos sustentables para el suministro de agua a bajos costos. Actualmente se está haciendo un esfuerzo para minimizar el impacto ambiental de las plantas enfocando las nuevas innovaciones tecnológicas hacia la operación de dichos procesos con fuentes alternas de energía, el uso de nuevas técnicas de automatización y control para que su operación sea más eficiente y por último que las plantas generen la energía que consumen. Otras tecnologías como la congelación, la separación de hidratos, el intercambio iónico o la extracción por solvente, se encuentran en desarrollo y se constituyen como opciones factibles.

CAPÍTULO 2.

PROCESOS DE DESALINIZACIÓN.

Debido a que el desarrollo de una comunidad depende en gran medida de su capacidad de abastecerse de energía y agua; el abastecimiento de agua potable es posible gracias a la implementación de procesos desalinizadores en regiones áridas o con pocas reservas de agua, siendo su uso más notable en los países del Medio Oriente, África del Norte y algunas Islas del Caribe.

La acumulación de sales en el agua y la desalinización de la misma, es un proceso natural que se ha realizado por años como parte del ciclo del agua ya que, al llover el agua que se precipita a la tierra tiende a ir al mar y es en este proceso donde el agua va acarreado las sales y minerales, una vez que llega al mar gracias al sol parte de esta agua se evapora para formar las nubes que producirán las lluvias y así continuar con el ciclo. El hombre observó dicho fenómeno y fue cuando se empezaron a utilizar algunos destiladores pequeños para su uso en barcos a mediados del siglo XIX, pero es durante la Segunda Guerra Mundial cuando se empiezan a desarrollar estas técnicas para abastecer de agua a las tropas establecidas en zonas áridas. Así las primeras unidades fijas de importancia aparecen en esta década de los 40's en islas o en zonas desérticas como Kuwait, Aruba o las Antillas Holandesas. Estas primeras plantas eran de destilación de múltiple efecto en donde lo más importante era la seguridad en su funcionamiento y no el costo del agua producida. Observado el potencial de la desalación, en la siguiente década, los 50's, se iniciaron las primeras investigaciones profundas sobre el problema de la desalación a fin de conseguir grandes instalaciones de producción de agua dulce a un costo competitivo con otras fuentes de abastecimiento, consiguiéndose avances realmente extraordinarios, de los cuales el mayor fue la introducción del sistema de evaporación súbita (flash) en múltiples etapas en el año de 1957. Con la primera planta comercial en 1960, es así que durante la década de los 60's plantas desalinizadoras que utilizaban este proceso fueron puestas en operación. En los 70's el uso de procesos de membranas se incrementó gracias al desarrollo de nuevos materiales para las mismas y para los 80's la desalinización es toda una empresa comercial con experiencia y bien establecida.

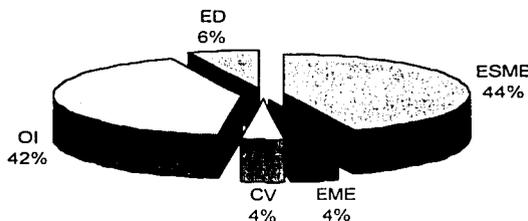
Los procesos de desalación de agua de mar se pueden dividir en dos grandes categorías: Procesos de Cambio de Fase o Procesos Térmicos y Procesos de Membrana o de una fase. En la tabla 5 se muestran las distintas tecnologías de desalinización que existen actualmente.

Procesos con cambio de fase	Procesos con membrana
1. Evaporación Súbita Múltiple Etapa (ESME)	1. Ósmosis Inversa (OI) OI sin recuperación de energía. OI con recuperación de energía (OI-RE)
2. Evaporación Múltiple Efecto (EME)	2. Electrodiálisis (ED)
3. Compresión de Vapor (CV)	
4. Congelamiento.	
5. Destiladores Solares.	

Tabla 2.1 Procesos de Desalinización.

Fuente: Soteris Kalogirou, "Survey of solar desalination and system selection", Energy Vol. 22, No1, pp 69-81, Pergamon Press, Great Britain, 1997.

En un inventario hecho por Klaus Wangnick para la Asociación Internacional de Desalinización (IDA por sus siglas en inglés) se indica que la capacidad total instalada de las plantas desalinizadoras a nivel mundial es de 22.7 millones de m³/d y está repartida en 100 países de los cuales 10 tienen el 75% de esta capacidad instalada. Del total casi el 50% se usa para desalar agua de mar en el Medio Oriente y África del Norte. Arabia Saudita es el país con mayor porcentaje de capacidad instalada con el 24% y la mayoría de sus unidades usan procesos de destilación. El segundo país son los Estados Unidos de Norteamérica que tiene el 16% de la capacidad mundial y sus unidades utilizan el proceso de ósmosis inversa para tratar aguas salobres. Así mismo este reporte indica que los procesos más utilizados son: el de evaporación súbita múltiple etapa y el de ósmosis inversa pues abarcan el 86% de toda la capacidad instalada y el restante 14% se lo reparten los procesos de evaporación múltiple efecto, electrodiálisis y compresión de vapor.

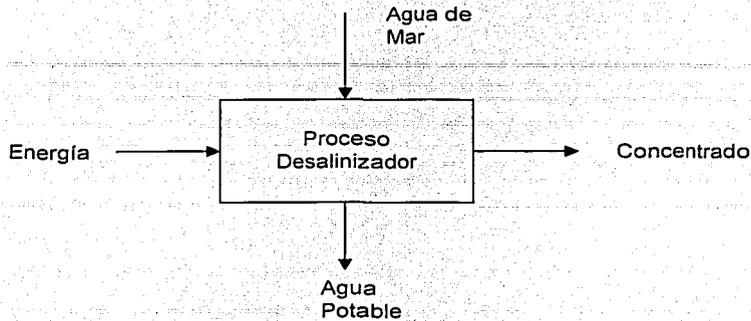


TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 2.1 Capacidad instalada por proceso

Fuente: The ABC's of Desalting by O. K. Buros.

En los procesos de desalación lo que se busca es separar el agua salina en dos corrientes de las cuales una va a tener la menor concentración posible de sales disueltas, llamada producto, y la otra va a contener el resto de las sales y se le llama concentrado.



PROCESOS TÉRMICOS O CON CAMBIO DE FASE.

La importancia de conocer estos procesos es evidente ya que cerca de la mitad del agua que se “desala” es producida por medio de la destilación cuando el agua salada es calentada para producir vapor de agua y que al condensarse obtenemos agua pura. Para hacer a estos procesos económicos lo que se hace es reducir la presión atmosférica en el agua que va a ser “hervida” con esto se controla su punto de ebullición, ya que la temperatura requerida para alcanzarla disminuye, esto asemeja lo que pasa por ejemplo aquí en el D. F. que el agua hierve a 93°C y no a los 100°C a nivel del mar, y esto se debe a la altura de la ciudad ya que la presión atmosférica no es de 1 atm sino de 0.76 atm aproximadamente.

En estos procesos es muy importante observar dos condiciones: tener la propia temperatura de cada presión que se maneje y suministrar la energía necesaria para la evaporación. El calentar agua hasta su punto de ebullición y que ésta continúe necesita de un suministro de calor, ya que al retirarlo en ese punto el agua por si sola sólo evapora por muy poco tiempo pues necesita de energía adicional para que evapore, (el llamado calor de vaporización). Por eso para renovar la evaporación lo que se hace es añadir más calor o reducir la presión.

Si se reduce la presión lo que se provoca es que el agua se encuentre a una temperatura por encima de su punto de ebullición provocando una evaporación súbita y que la temperatura descienda a una nueva temperatura de punto de ebullición. Entre más vapor pueda ser producido, para después ser condensado y obtener agua pura, con la misma cantidad de calor entonces se tiene que el proceso es más eficiente.

Como los procesos térmicos requieren de altas cantidades de energía para la vaporización, éstos se llevan a cabo en recipientes que están dispuestos sucesivamente y que operan cada uno a una temperatura y presión diferentes y menores al que los precede. Con esto se obtiene que la ebullición continúe, pero si la presión se reduce lo suficiente se puede tener que ocurra la ebullición y el congelamiento al mismo tiempo.

Por otro lado en los procesos térmicos otro factor importante es el control de la formación de sales, lo cual es muy complejo debido a que casi todas las sustancias se disuelven en el agua cuando está apenas tibia, y es por esto que los sulfatos y carbonatos que se encuentran en el agua de mar se llegan a separar de ella cuando ésta alcanza los 105°C lo que forma un gran depósito de sal en el tubo o cualquier superficie presente creando problemas tanto térmicos como mecánicos. Esto se evita controlando el nivel de concentración del agua de alimentación y la temperatura máxima del proceso. Otra forma es añadiendo químicos lo que permite una temperatura máxima de 110°C. La implementación de estos dos conceptos permitió un uso exitoso de los procesos de destilación en especial del proceso ESME.

Evaporación de múltiple efecto (EME).

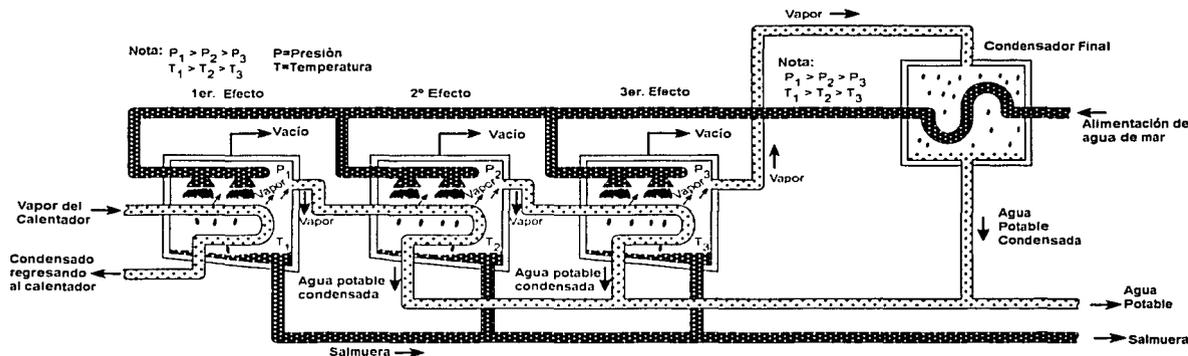


Figura 2.2 Diagrama de una planta con el proceso de Evaporación Múltiple Etapa de tubos horizontales.
Fuente: ABC's of Desalting by O. K. Buos.

Este proceso usa el principio de condensación y evaporación en un ambiente con presión reducida y se compone por un número de elementos llamados efectos. Lo anterior permite que el agua alimentada llegue al punto de ebullición sin la necesidad de suministrar más calor que el que se necesita para el primer efecto. El vapor de un efecto es usado como fluido de calentamiento en el siguiente efecto ya que la condensación de éste causa la evaporación de la solución salina que entra al siguiente efecto. El vapor producido pasa al siguiente efecto donde mientras condensa hace que parte de la solución evapore y así continúa en los siguientes efectos. Para que este proceso se lleve a cabo el siguiente efecto debe estar a una presión más baja que el efecto de donde proviene el vapor (Mustacchi, 1981 citado por Kalogirou, 1996).

En este proceso el vapor es producido por ebullición y evaporación súbita, pero la mayoría del destilado es producido por ebullición. Contrario al proceso de Evaporación Súbita Múltiple Etapa (ESME) el proceso EME opera, generalmente, en un solo paso sin recirculación del concentrado alrededor de la planta. Esto reduce requerimientos de bombeo. Como en ESME el concentrado que va saliendo pasa a través de una serie de

calentadores pero en el último calentador en lugar de entrar el concentrado, entra la alimentación donde el vapor de éste eleva su temperatura a la temperatura de saturación de la presión a la que está este último efecto (Kalogirou, 1996).

En resumen la cantidad de vapor producida por un calentador externo para el primer efecto, es usado para producir la evaporación en este efecto, este vapor pasa a ser la fuente de calor para un segundo efecto el cual está a una presión más baja para recibir el concentrado de la primera etapa. Este proceso se repite en toda la planta. El concentrado y destilado pasan por debajo del sistema, el cual está en una progresiva reducción de la presión.

Hay muchas posibles variaciones en una planta EME, pues depende de la combinación de los intercambiadores de calor y de cómo fluyan los líquidos dentro de éstos. En un principio las plantas eran del llamado diseño de tubos sumergidos y sólo usaban dos o tres efectos. En los diseños actuales el problema de baja evaporación ha sido resuelto inyectando el agua salada en forma de películas delgadas de líquido que se distribuye en la superficie de calentamiento en lugar de la gran piscina que antes formaba el agua de alimentación. Estas plantas pueden tener tubos horizontales o verticales. Las de tubo vertical son de dos tipos: las de capa ascendente con circulación forzada o de tubos largos verticales en los cuales la capa delgada del flujo cae, en éstas últimas el concentrado evapora dentro del tubo y el vapor condensa afuera. En las de tubos horizontales el vapor condensa adentro del tubo y el concentrado evapora afuera (Arreguin et al, 1998).

La principal diferencia de una planta ESME y una EME es que el vapor de cada efecto solo pasa al otro efecto para calentar la alimentación y de hecho estas plantas requieren de un circuito más complicado de tuberías que las plantas ESME pero es mucho más ajustable para ser manejado con energías renovables pues los niveles de equilibrio de temperaturas y presiones de operación son menos críticos. Por último, el proceso de Compresión de Vapor (CV) puede ser usado en conjunto con un sistema EME, teniendo como desventajas por parte del proceso de CV a la corrosión y limitantes en la capacidad de los compresores (Kalogirou, 1996).

Evaporación súbita de múltiple etapa (ESME).

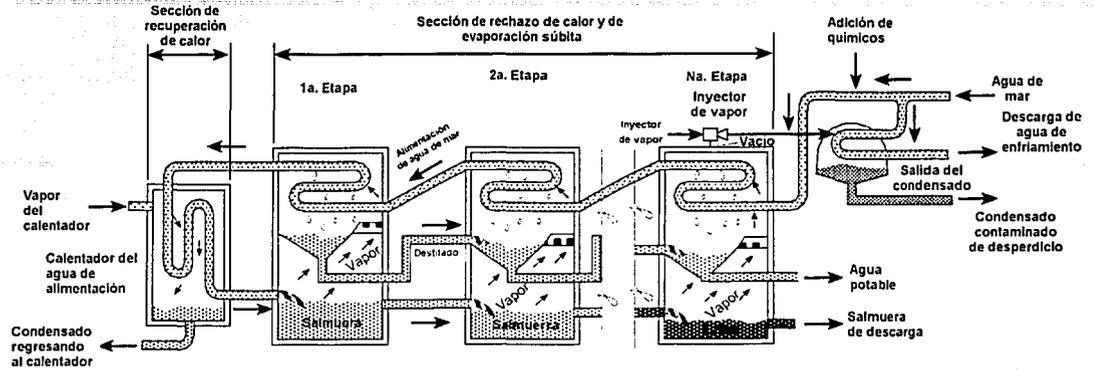


Figura 2.3 Diagrama de planta con el proceso de Evaporación Súbita Múltiple Etapa.

Fuente: ABC's of Desalting by O. K. Buross.

La planta ESME se compone de una serie de elementos llamados etapas. En cada etapa el vapor condensado es usado para precalentar la alimentación de agua de mar. Lo que se hace es dividir en todas las etapas la diferencia de temperatura que existe entre el calor de entrada al proceso y la temperatura del agua de mar, de esta forma el sistema casi alcanza a reutilizar todo el calor latente del vapor. La operación de dichos sistemas requiere de un gradiente de presiones dentro de la planta, dicho gradiente va de 2.5 a 1 atm, por lo tanto el vapor generado se considera como vapor de baja presión. Instalaciones comerciales están diseñadas de 10-30 etapas con una variación de 2° C en cada etapa (Mustacchi, 1978 citado por Kalogirou, 1996).

El sistema está dividido en dos secciones: recuperación de calor y rechazo de calor. La alimentación del agua de mar es a través de la sección de rechazo de calor. Esto es para que tanto el agua destilada y el concentrado salgan a la temperatura más baja posible debido a que ceden su calor al agua de entrada. La alimentación entra después a un calentador convencional para elevar su temperatura a la de saturación de la presión máxima del sistema. El agua pasa después a la primera etapa, en la cual la presión ha sido reducida y debido a que el agua está en su temperatura de saturación y a una mayor presión ésta se sobrecalienta y evapora súbitamente (Kalogirou, 1996).

Lo que ocurre es producto de introducir agua calentada en una cámara con presión reducida causando que alcance su ebullición rápidamente, casi explotando en vapor, pero generalmente sólo es en un porcentaje mínimo, pues depende de que tan reducida esté la presión dentro de la cámara, y la ebullición continua hasta que el agua se “enfria” a la temperatura del punto de ebullición de dicha presión. Las plantas operan usualmente a una temperatura máxima de 110°C ya que si se operaran a temperaturas mayores, si bien se aumentaría su eficiencia, también se incrementaría la formación de sales y se aceleraría la corrosión de los metales (Buros, 2000).

Este es el método más usado en el mundo en términos de capacidad dado la simplicidad del mismo, características de rendimiento y el control sobre la formación de las sales. La desventaja es que requiere una precisión en el gradiente de presiones de las etapas y lleva tiempo que el sistema se estabilice (Kalogirou, 1996).

Por otro lado la operación eficiente requiere agregar al agua salada sustancias que reduzcan la formación de sales en los tubos y por tanto la corrosión permitiendo una recirculación del agua salada de desecho en el proceso. Con la utilización de las cámaras para rechazo de calor se logra un requerimiento de calor mucho menor y un mejor control de la salinidad (Spiegler et al., 1994).

Países de la Península Arábiga como Arabia Saudita, Oman, Emiratos Árabes Unidos y Kuwait dependen de éste proceso para satisfacer la demanda de agua en áreas urbanas y son estos países los que han invertido grandes cantidades de dinero en capacitación, investigación en métodos de operación, seguridad, químicos para prevención de formación de sales, y así como también en otros métodos de desalinización (Buros, 2000).

Compresión de vapor.

En este proceso se emplea esencialmente energía mecánica pues el vapor que se comprime sirve como fuente de energía. Éste consta de un intercambiador de calor, un evaporador y el compresor. Para empezar se calienta el agua de mar en el intercambiador de calor por donde circulan tres flujos: agua de mar fría, y a contracorriente el condensado y agua de mar concentrada caliente; ahí el agua de mar eleva su temperatura para entrar al evaporador donde parte evapora a presión por debajo de la atmosférica, este vapor se comprime y vuelve a entrar sobrecalentado al evaporador para condensar y ceder calor, el condensado y el agua de mar concentrada caliente pasan al intercambiador de calor para ceder calor al agua de mar fría.

El conjunto se mantiene en vacío para trabajar a una temperatura de 40-50° C. Para este proceso es necesario un sistema de calor de arranque con el propósito de facilitar la puesta en régimen y compensar las pérdidas térmicas. Ya que el compresor es la unidad principal de la instalación el consumo de energía de estas unidades está entre 25-30 kWh/m³ de agua fresca producida del agua de mar. Mientras más pequeña es la unidad, más grande es el consumo de energía por unidad de agua producida, esto se debe a la gran pérdida de calor en las unidades de pequeña capacidad. Aún en las unidades de mayor capacidad únicamente alrededor de la mitad de la energía es usada en el compresor, la otra mitad es consumida en el calentamiento del agua salada. El sistema tiene como ventaja principal lo compacto del aparato y que es competitivo para producciones de entre 100 y 200 m³/día (Spiegler, 1994, p.76-78).

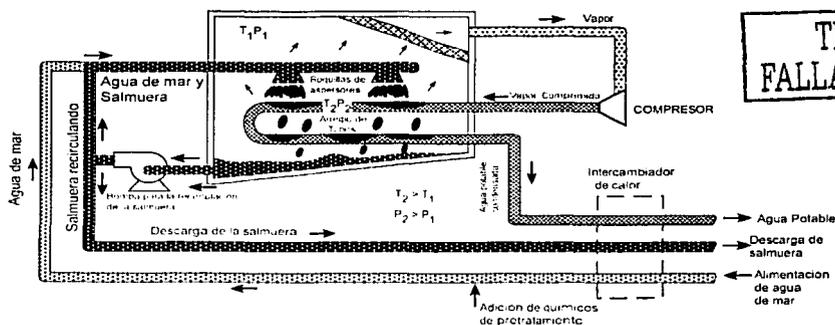
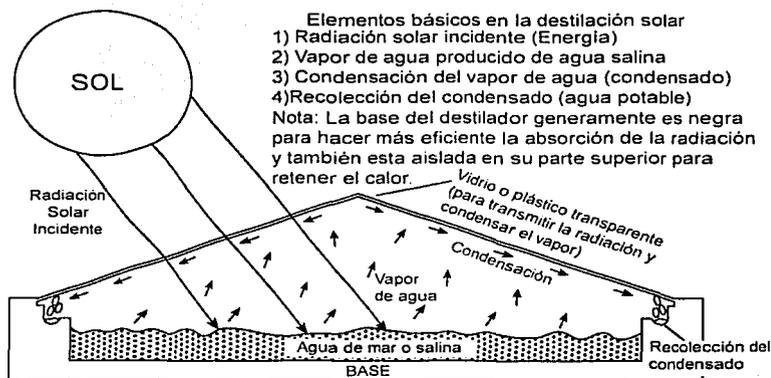


Figura 2.4 Proceso de Compresión de Vapor.

Fuente: ABC's of Desalting by O. K. Buross

Evaporadores Solares.

Los destiladores solares utilizan el efecto invernadero para evaporar el agua salada. El cual es como una trampa de calor ya que el techo de vidrio actúa como cuerpo transparente a la entrada del rayo solar pero actúa como cuerpo opaco a las radiaciones infrarrojas emitidas por el agua caliente. La producción diaria del destilador es alrededor de 3-4 l/m². Dentro del desarrollo de los destiladores se ha hecho énfasis en los materiales que lo forman pues se quieren utilizar plásticos en vez de vidrios pero el problema principal es su corta vida útil por otro lado la forma de los mismos también ha sufrido modificaciones para elevar su eficiencia. En un destilador solar el agua salada es contenida en un depósito con fondo negro y una cubierta inclinada transparente, para ser calentada por el sol. El vapor de agua se eleva hasta la cubierta donde se condensa, formando una película que corre hacia un colector donde se almacena. La cantidad de agua está determinada en primer lugar por la intensidad de la radiación solar incidente, que provoca la evaporación del agua así como la diferencia de temperaturas entre la superficie del agua y la superficie transparente. Esta diferencia produce las fuerzas de evaporación y condensación. Si no hay radiación solar, estas fuerzas desaparecen ya que el agua salada en el contenedor se enfría rápidamente y se reduce la presión de vapor por lo que el proceso de evaporación virtualmente se detiene (Kalogirou, 1996, p.70).



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 2.5 Diagrama de un destilador solar.
Fuente: The ABC's of Desalting by O. K. Buross

Aunque la energía solar es gratuita, los costos de las instalaciones solares son considerables dado que únicamente unos pocos litros pueden ser producidos por metro cuadrado, dichos gastos van de 9,000 a 66,000 USD/m³. Por lo tanto es muy importante diseñar evaporadores de bajo costo con una máxima utilización de la energía incidente. Para estimar la posible producción y las inevitables pérdidas, es necesario conocer la cantidad de radiación solar recibida en el sitio donde se instalará la planta de evaporación. La cantidad de energía solar depende de la latitud, las condiciones atmosféricas, la época del año y la hora del día (Arreguin, et al., 1998, p.29). Aquí en México el Instituto de Ingeniería de la UNAM ha estudiado durante los últimos 25 años los usos térmicos de la energía solar. Parte de dichos estudios se han dirigido a la destilación solar con los cuales se logró la instalación de sistemas de destilación solar en La Paz, Baja California Sur, y Puerto Lobos, Sonora.

PROCESOS DE MEMBRANA.

Los procesos de membrana son tan comunes que ocurren a diario en nuestro cuerpo ya que cada célula de nuestro cuerpo actúa como tal al retener y dejar pasar ciertas sustancias. En otro orden de ideas en los procesos de desalación las membranas son usadas en dos procesos de gran importancia, incluso comercial, que son: electrodiálisis (ED) y ósmosis inversa (OI), estos procesos utilizan la habilidad de las membranas para diferenciar y separar selectivamente las sales y el agua, sin embargo las membranas tienen usos diferentes en cada uno de estos procesos. Debido a la aparente sencillez de los procesos, éstos fueron caso de estudio desde principios del siglo XX pero su comercialización para tratar agua con fines de consumo humano se lleva a cabo en los últimos 30 a 40 años.

La Electrodiálisis (ED) es un proceso que se basa en el uso de una diferencia del potencial eléctrico o voltaje, que se utiliza para mover las sales selectivamente a través de la membrana, dejando el agua pura como producto del proceso.

La Ósmosis Inversa (OI) es un proceso de alta presión, ya que la presión es usada para llevar a cabo la separación por medio del paso de agua de mar o salina a través de la membrana dejando las sales atrás.

Ósmosis Inversa.

Este proceso es quizá el más sencillo y al parecer el de mejores rendimientos energéticos y toma su nombre por realizarse con el paso de las soluciones en forma contraria a los procesos osmóticos normales. Estos se basan en el hecho de que cuando un material de intercambio iónico está en contacto con una solución salina, éste selecciona el agua en lugar de la sal; dicho material son las membranas semipermeables que dejan pasar con más facilidad el agua dulce que el agua salada ya que las soluciones menos concentradas se desplazan, por diferencia de energía potencial, hacia las más concentradas a través de dicha membrana sin la aplicación de ninguna fuerza externa hasta alcanzar la misma concentración (Arreguin, et al., 1998).

El aumento de la presión en el lado del agua salada puede hacer pasar el agua al compartimiento menos salino, dejando atrás parte de las sales. La mínima presión necesaria es de 24.8 atm (2.51 MPa), que se conoce como la "presión osmótica" del agua de mar. La presión neta de trabajo es la que obliga al agua a atravesar la membrana y ésta es la diferencia entre la presión aplicada en ambos lados de la membrana (alimentación y filtrado). En la práctica, la presión debe ser de 60 a 100 atm para obtener flujo razonables de filtración, y debe ser tomado en cuenta que la concentración de sal en el agua de mar se incrementa durante el proceso, aumentando también la presión osmótica (Spiegler, 1994, p.111-112).

La cantidad de sustancias disueltas que pasan a través de la membrana por unidad de tiempo es directamente proporcional a la diferencia que hay entre las concentraciones del lado de alimentación y el filtrado. Por otro lado la cantidad del filtrado producido en una unidad de tiempo es proporcional a la presión neta y a la temperatura del agua de alimentación de tal forma que si se duplica la presión y se mantiene la temperatura constante, se obtendrá el doble de la cantidad del agua que pasa a través de la membrana (Arreguin, et al., 1998, p.24).

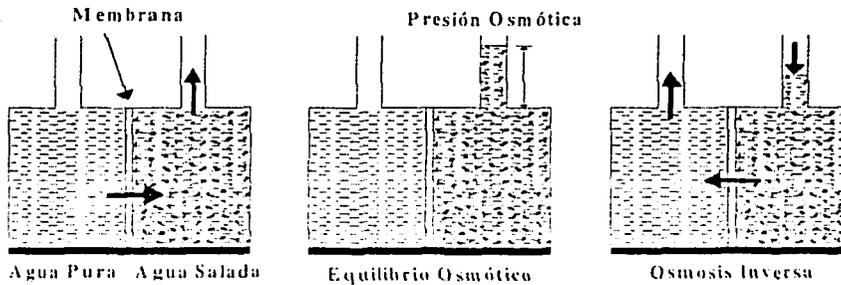


Fig. 2.6 Principio de la ósmosis inversa.

Por lo tanto para este proceso lo importante es la selección de la membrana, tanto por sus materiales como por su área ya que una de 1 m^2 destila 400 litros, en la actualidad se estudian membranas de películas plásticas y la relación entre su composición y la capacidad de filtración de sales. La vida útil de las membranas puede ser de hasta 5 años y la capacidad de producción varía de 25,000 a 60,000 l/d/m^2 . Las membranas pierden permeabilidad si el agua original lleva un exceso de sílice disuelta o de hierro y también es nociva la presencia de materia orgánica por lo que el agua de alimentación debe tener una turbidez y contenido en materias en suspensión muy bajo. Típicamente una membrana de ósmosis inversa procesa el agua de mar de 36,000 ppm y la convierte en agua dulce con una salinidad inferior a 50 ppm. Las plantas de ósmosis inversa tienen la ventaja de que los costos de instalación son más bajos que en el caso de la destilación y que su operación es continua y dichas instalaciones requieren poco espacio pero tienen la enorme desventaja que los costos de operación son considerablemente más altos que los de una planta de ESME (Spiegler, 1994, p.112-114).

El proceso de ósmosis inversa se ha desarrollado en una abierta competencia con los procesos de destilación. Sus principales ventajas son no requerir calor, no involucrar un cambio de fase y poderse desarrollar a temperaturas ambiente.

Hasta 1980, la evaporación fue el método preferido para desalar agua de mar, aunque dos métodos basados en membranas, electrodiálisis y ósmosis inversa probaron ser más

económicos para desalar agua salobre de una menor salinidad que la del agua de mar. Debido al fuerte desarrollo de las membranas para la desalación de agua de mar y de la eficiencia de la tecnología en las plantas las últimas dos décadas, las plantas con procesos de membrana han incrementado su participación en el mercado de la desalación. Para 1986 más de la mitad de los contratos para la construcción de plantas de desalación fue para el proceso de ósmosis inversa (OI). Esto incluye aplicaciones tanto para agua salobre como de mar (Spiegler, 1994, p. 126-127).

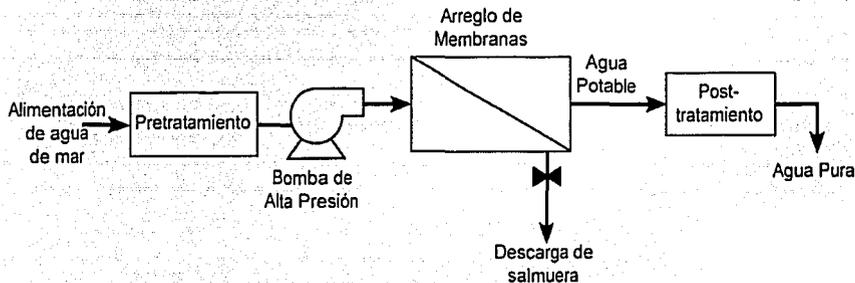


Figura 2.7 Componentes básicos de una planta de Ósmosis Inversa.
Fuente: The ABC's of Desalting by O. K. Buross.

En 1994 más de 2000 grandes plantas de OI con una producción combinada de 2.66 millones de toneladas de agua potable por día estaban operando en 63 países. Alrededor de un tercio de esta producción se encuentra en los Estados Unidos, tan sólo en Florida contaba con 70 plantas produciendo más de 100 toneladas por día de agua potable y la planta más grande se encuentra en Yuma, Texas que se utiliza para reducir la salinidad del agua del Río Colorado y produce 270,000 m³/d (Buross, 2000).



Figura 2.8 Planta de OI en Yuma, Texas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Electrodiálisis.

Este sistema trabaja reduciendo la salinidad por la transmisión de los iones de una solución a través de membranas bajo la influencia de un potencial eléctrico. Dicha solución salina contiene iones de sodio cargados positivamente e iones de cloro cargados negativamente. Al hacer circular un potencial eléctrico éstos iones se moverán hacia el electrodo de carga opuesta, que se encuentra sumergido en la solución, es decir que los iones positivos (cationes) se moverán hacia el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos (aniones) hacia el electrodo positivo (ánodo). Si se utilizan membranas especiales que sean permeables por un lado a los cationes y por el otro a los aniones entre los electrodos, en dicho espacio quedará agua sin sales (Spiegler, 1994, p.131).

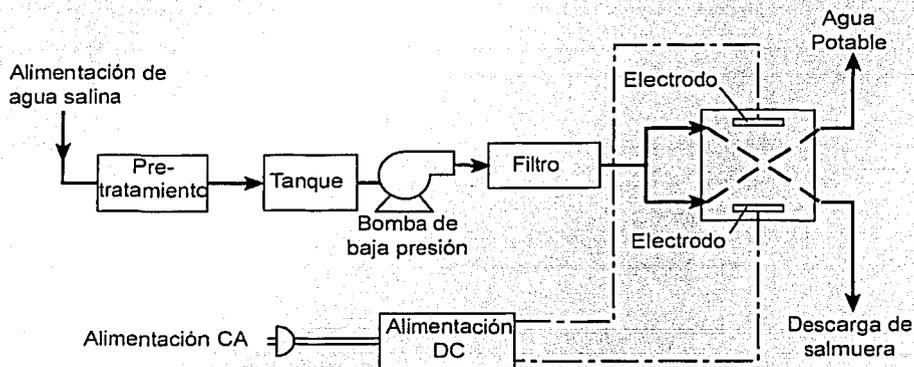


Figura 2.9 Componentes de una planta de Electrodiálisis

Fuente: The ABC's of Desalting by O. K. Buros

Las membranas de electrodiálisis son básicamente resinas de intercambio iónico, catiónicas o aniónicas, en forma plana. Una célula de electrodiálisis consiste en una cámara dividida en compartimentos por una serie de membranas paralelas separadas del orden de 1mm, existiendo una alternancia de membranas catiónicas y aniónicas, en los extremos se aplica el diferencial de potencial. De acuerdo con el sentido del potencial establecido, uno de los espacios pierde salinidad mientras el contiguo la aumenta. La electrodiálisis no elimina totalmente las sales, sino que con ella se obtiene una reducción en un 40% de las mismas por lo que su aplicación es principalmente para aguas salobres de baja salinidad y en principio no sirve para utilizarse con agua de mar (Arreguin, et al., 1998).

Otros procesos.

Estos procesos no tienen aún un desarrollo comercial como los anteriores pero en circunstancias muy especiales pueden ser considerados o se piensa que tienen potencial para ser mejorados en un futuro y específicamente son: congelamiento y destilación con membranas.

El proceso de congelamiento es enfriar el agua de mar hasta formar cristales de hielo pero antes de que se formen por completo “se lava” y “se raspa” la sal que queda en el agua o adherida en los cristales de hielo que después se calientan para producir agua potable. Este proceso tiene como ventaja de que teóricamente se necesita menos energía para congelar el agua que para destilarla y por lo tanto se reduce la corrosión y la formación de sales pero el proceso no ha tenido éxito en aplicaciones para desalar agua de mar para fines de consumo humano y probablemente tenga mejor aplicaciones en tratamientos de aguas industriales.

La destilación con membranas se lleva a cabo por medio del paso del vapor de agua por una membrana, la cual no deja pasar líquidos, es decir no deja pasar ni agua de mar ni condensado. La gran ventaja es que opera con una pequeña diferencia de temperatura por lo que se está experimentando su uso en destiladores solares.

Impacto Ambiental.

Para concluir este capítulo como en todo proceso se tiene un impacto ambiental y la desalinización no es la excepción, los más importantes son: las descargas de salmuera y emisiones atmosféricas.

El consumo de energía de entrada ya sea térmica o mecánica para obtener la separación del agua y las sales, implica por lo tanto emisiones atmosféricas que están relacionadas con la producción de energía.

Otras descargas atmosféricas las encontramos en la deaeración y degasificación del agua de alimentación y de la producida siendo el SO_2 y los NO_x los principales contaminantes. En este aspecto es evidente que se producen más descargas atmosféricas en el proceso ESME que en el de OI (Van der Bruggen, 2002).

Las descargas de salmuera es un poco más complicada ya que principalmente son tres los aspectos más preocupantes: la temperatura a la cual es descargada; la salinidad de la misma; y los químicos que se le adicionan a dicha descarga.

El incremento de la temperatura involucra a los proceso térmicos y es en el ESME donde la salmuera de descarga tiene un aumento de 10°C , en cambio empleando OI la descarga sale a la misma temperatura. El incremento de temperatura tiene un efecto negativo en el contenido de oxígeno del agua, pero este mismo problema se tiene cuando se aumenta la salinidad del agua y en la utilización de OI la salinidad en la descarga es mayor que en cualquier otro proceso, de cualquier forma la salmuera de descarga lo único que tiene es un impacto ambiental local pues si se descarga al mar en realidad son las mismas ppm que contenía. Sin embargo la adición de químicos si es una contaminación real, y ésta se divide en tres categorías: biocidas, los cuales pueden ser usados en todos los procesos, inhibidores para la formación de sales que se usan tanto en OI y destilación, y anti-espuma usados en la destilación. En este aspecto se están desarrollando nuevos productos como aditivos poliméricos y anti-espuma biodegradable con menor toxicidad, sin embargo los biocidas aún son necesarios y difícilmente se pueden remplazar por productos con menor impacto (Van der Bruggen, 2002).

Debido a que se quiere promover el uso de una planta de desalinización de agua de mar que provoque el menor impacto ambiental posible, para tal fin se propone en primer lugar el uso de energía solar como fuente de energía, la cual operaría con el proceso de ósmosis inversa por ser el más amigable con el ambiente y se piensa que sería el que menores complicaciones tendría para operar con dicha fuente de energía por ser el de menor requerimiento energético. Por lo anterior los siguientes capítulos tratan los temas de ósmosis inversa y de conversión de energía solar a energía eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas que son los dos elementos a unir para lograr dicho fin.

CAPITULO 3.

OSMOSIS INVERSA.

En el Capítulo 2 se describieron brevemente los diferentes procesos de desalinización que existen y en éste se hablará acerca del proceso de osmosis inversa, pues en este trabajo se considera que es el proceso que menos problemas tendría para ser acoplado con la energía solar, ya que en la actualidad se están haciendo estudios en varios campos que lo harían factible. Dentro de estos campos están: el estudio de nuevas membranas que permiten una menor presión de trabajo en el proceso, lo que reduciría los requerimientos de energía de entrada, también el avance de nuevas técnicas de producción en celdas fotovoltaicas que las harían más eficientes y más baratas y de esta forma se reduciría el número de celdas a utilizar para dicho fin y su costo, además de que desde la década de los 80's se han hecho estudios sobre acoplar bombas de alta presión con celdas fotovoltaicas, y por último todo lo logrado en el campo de producción de energía eléctrica a través de la energía solar térmica.

Haciendo un poco de historia fue en el año 1748 cuando se observó por primera vez el fenómeno de ósmosis por el clérigo francés Abbé Nollet. A partir de ese momento la ósmosis tomó especial interés en estudiantes de biología y medicina cuyos trabajos experimentales eran con membranas de origen animal o vegetal. En 1855 Graham empleó el término de diálisis para referirse a los procesos de difusión selectiva a través de membranas semipermeables. Fue en el año de 1867 que apareció la primera membrana semipermeable inorgánica, la cual fue hecha por Traube, la cual constaba de una película delgada de ferrocianuro de cobre soportada en una tela porosa que mostraba una marcada selectividad hacia las soluciones diluidas en los electrolitos. Las siguientes investigaciones estuvieron relacionadas con técnicas para medir la presión osmótica, lo que permitió el desarrollo de procesos que incluían el uso de membranas que trabajaran a dicha presión. En 1907 Bechold publica sus estudios de ultrafiltración los cuales constaban de hacer pasar soluciones, usando presiones de varias atmósferas, a través de membranas hechas de filtros de papel impregnadas con ácido acético colodion (Glater, 1998, p.298).

Pero no es hasta 1937 que con la creación del nylon por Carother que se obtienen membranas de alto rendimiento y el constante desarrollo de los polímeros permiten producir membranas para la ultrafiltración y nanofiltración, pues dichas membranas están hechas con polímeros condensados a base de síntesis de nylon. Según Julius Glater de la Universidad de Los Ángeles, Ca., fue el investigador Hassler, de esta misma universidad, quien introduce por primera vez el concepto de desalinización por membrana al hacer referencia a un experimento que hacía pasar vapor a través de hojas de celofán en el año de 1950 y en 1954 este mismo investigador diseña y construye un experimento con el principio de la ósmosis inversa cuyo estudio y perfeccionamiento le llevaría más de cinco años (Glater, 1998, p.299).

En la actualidad la osmosis inversa (OI) es uno de los procesos de membrana más utilizado para tratamiento de agua potable. La OI es capaz de rechazar partículas tan pequeñas como $0.0001\mu\text{m}$, y se describe como un proceso de difusión controlada en que la transferencia de masa de iones a través de las membranas está controlada por difusión. Este proceso puede llevar a cabo la remoción de la mayoría de los contaminantes del agua potable conocidos hoy en día pero la mayoría de los gases disueltos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el dióxido de carbono (CO_2), y algunos pesticidas pasan a través de las membranas de la OI, sin embargo con esta tecnología se pueden tratar un gran número de contaminantes del agua potable, más que ninguna otra tecnología de tratamiento de aguas (Taylor, 1995 citado por Taylor y Jacobs, 1999, p.293).

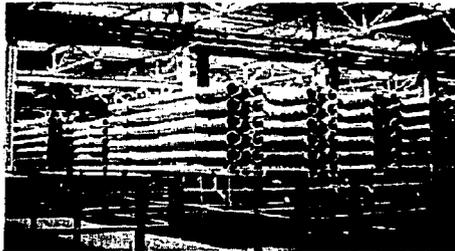
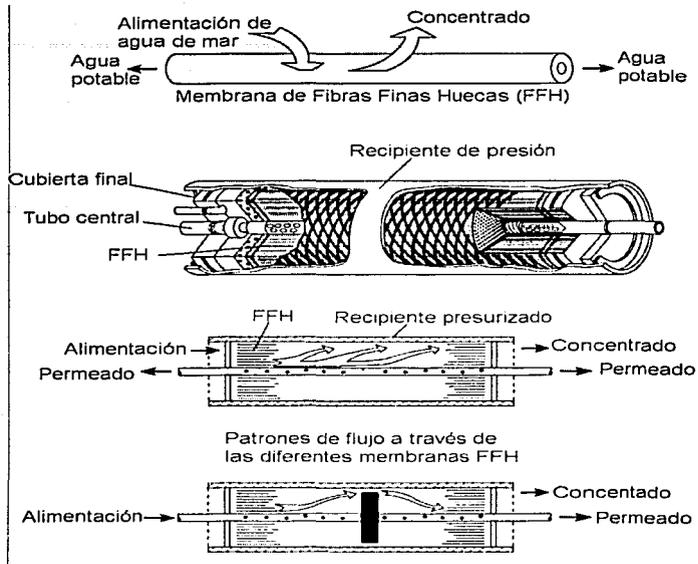
Una de las primeras aplicaciones de la tecnología de membrana fue la conversión del agua de mar en agua potable por OI, donde se eliminaban las sales disueltas, principalmente, el cloruro sódico. Las membranas en un principio eran de acetato de celulosa y eran mucho menos permeables que las membranas modernas y requerían una presión actuante mucho mayor. La elevada presión era mayor de 68 atm y solamente del 10 al 25% del agua bruta se recuperaba como producto. Ahora, las membranas son de capas más finas y compactadas lo que proporciona una mayor productividad y mayor rechazo salino, lo que permitió bajar el rango de presiones de entre 53.3 a 79 atm dependiendo las concentraciones de sal que se manejen en el agua de alimentación.

Existen membranas de alta y baja presión, la diferencia entre ambas es la permeabilidad del agua y la sal. La membrana de OI de alta presión es mucho menos permeable que la membrana de Nanofiltración (NF) por ejemplo, esto es porque la concentración de sal de agua de mar es normalmente mucho mayor que la concentración en el agua salobre, y la cantidad de sal que pasa a través de una membrana de difusión controlada está relacionada directamente con la concentración del agua de alimentación. Una membrana de alta presión es mucho más gruesa que una de baja presión para alcanzar la misma concentración de sólidos disueltos o sal en el permeado o producto.

Según James Taylor, de la Universidad de Florida Central, la OI y la NF jugarán un papel creciente e importante en el futuro del suministro mundial de agua. Esto es debido a que no hay ningún otro proceso de tratamiento que pueda producir la misma calidad de agua de una fuente de agua subterránea altamente salina u orgánica tan económicamente como la OI y NF (Taylor, Jacobs, 1999, p.294).

Debido a que la OI es un proceso de membrana, es conveniente hablar de los tipos de membrana que se utilizan en él, de las cuales las dos más importantes son: la de fibra fina hueca y la de los elementos enrollados en espiral, de éstas la primera es la que más comúnmente se usa para la desalación de agua de mar.

Los *módulos de fibra fina hueca* (FFH) consisten en un recipiente a presión, en cuyo interior hay un cartucho conteniendo un conjunto de membranas, el cual tiene diámetros interior y exterior de 41 y 90 μm , respectivamente. Este conjunto se ha creado doblando un grupo de fibras huecas en forma de U y fundiéndolo con resina epoxi por uno de los extremos terminales en una placa final. La corriente de alimentación, fluye radialmente desde el centro del tubo de alimentación al canal de recogida de salmuera en el exterior del elemento. La mayor velocidad de la corriente de alimentación se encuentra donde entra en el módulo y la menor velocidad está en la zona exterior de las membranas. La recuperación de un elemento de FFH varía del 10 al 50% y es más elevada que la de un elemento de membrana enrollado en espiral (Taylor, Jacobs, 1999, p. 296-298).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.1 Unidad de membranas de Fibra Fina Hueca (FFH)

Fuente: ABC's of Desalting by O. K. Buros.

El otro tipo de dispositivos usados son los *elementos enrollados en espiral* que están fabricados a partir de hojas planas de membrana. Constan de envolturas de membranas agregadas a un tubo central que recolecta la corriente del agua permeada. Una envoltente de membrana es una membrana de hoja plana que ha sido colocada y enrollada sobre un separador de corriente de permeado. La hoja plana consta de dos capas integrales y una capa-membrana permselectiva situada sobre un soporte tejido de textura porosa. La capa activa de la membrana está en la parte exterior del enrollamiento.

La envolvente está pegada a lo largo de los tres bordes abiertos y cerca del rollo. El separador de permeado está completamente encerrado en el rollo. El final del rollo está pegado a corta distancia del rollo, porque el final está conectado al tubo colector central. El final del rollo detiene el flujo de corriente de alimentación y permite que la presión permanezca en la corriente del permeado para dirigirla hacia el tubo colector central. La corriente de alimentación entra a través del extremo abierto del elemento enrollado en espiral, por el canal creado por el separador de la corriente de alimentación. La alimentación puede fluir paralelamente al tubo colector central, o a través de la capa activa de la membrana y soporte de membrana, por el interior del canal formado por los separadores de la corriente del permeado (Taylor, Jacobs, p. 298-299).

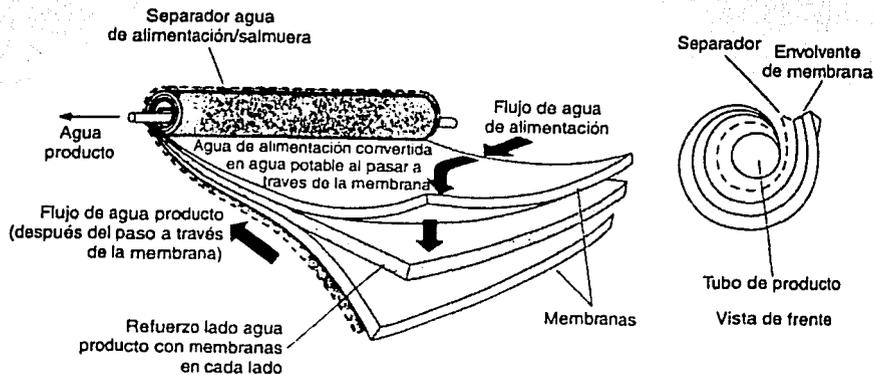


Figura 3.2 Unidad de membranas de OI enrollada en espiral
Fuente: Tratamientos del agua por procesos de membrana. AWWA.

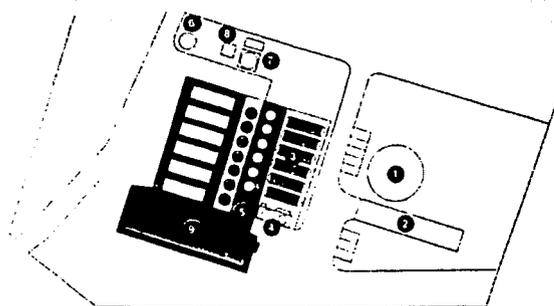
Las membranas de OI para agua de mar deben tener propiedades de retención de sal muy altas para producir agua de calidad potable en un solo paso. El agua de mar tiene un contenido de sólidos disueltos totales (SDT) de 35,000 mg/l y debe producirse agua con $SDT < 500$ mg/l, con relaciones de recuperación de más del 35%, las membranas deben tener eficiencias de eliminación salina de más del 99%. Las membranas de agua de mar están expuestas a presiones de trabajo muy elevadas debido a la elevada presión osmótica del agua de mar de alimentación, que es mínimo de 24.5 atm. Para asegurar una productividad adecuada, las membranas de OI de agua de mar trabajan normalmente a presiones entre 48 a 68 atm, pero en realidad puede llegar a ser de hasta 80 atm. Las membranas de desalación accionadas por medio de presión pueden agruparse en dos clases: membranas asimétricas y membranas de capa delgada de composite. Las membranas asimétricas han estado en uso desde el comienzo de la tecnología de membranas en los sesentas, pueden tolerar una exposición continua a bajos niveles de concentración residual de cloro. En la actualidad DuPont fabrica membranas asimétricas de poliamida aromática, que son materiales con excelentes propiedades de retención que pueden emplearse en un más amplio rango de pH. Por otro lado las membranas de capa fina composite tienen unas barreras desaladoras casi perfectas y capacidades de retención salina muy elevadas. Su rendimiento de caudal es muy elevado también y pueden soportar altas presiones de trabajo y temperaturas tan elevadas como los 50°C.

Una membrana de OI y NF haría la siguiente distinción en la retención de las siguientes soluciones de alimentación a bajas concentraciones:



La distinción entre OI y NF se apoya en el hecho de que una membrana de NF con retención del 50% de NaCl retendrá además el 90% de $MgSO_4$, mientras que en el caso de OI dicha retención no sería tan grande. Las membranas de NF son, a veces, membranas de OI con pérdidas.

El uso futuro del agua tratada determinará la selección de membranas para los procesos de OI/NF. La NF proporciona eliminación de color, desendurecimiento o control de subproductos precursores. La OI proporciona el mismo tratamiento que la NF, adicionalmente a una mayor remoción de STD. La OI a baja presión se utiliza comúnmente para producir agua potable de las aguas salobres brutas con una concentración de sólidos totales disueltos de hasta 12,000 mg/l. La OI a alta presión puede producir agua potable (STD < 500 mg/l) a partir de agua de mar (STD > 34,000 mg/l). Las plantas de OI de aguas de mar son operadas normalmente en rangos de recuperación de 30-50%. El control efectivo de los depósitos e incrustaciones llega a ser muy importante con estas elevadas tasas de conversión. Cualquier corriente de agua bruta utilizada como corriente de alimentación para un proceso de membrana debe comprender un pretratamiento convencional o avanzado. El pretratamiento convencional incluye adición de ácido o anti-incrustante para evitar la precipitación de sales durante la filtración de las membranas. El pretratamiento avanzado tiene lugar antes del pretratamiento convencional y es necesario cuando el agua cruda o bruta tiene excesivos materiales ensuciadores. La filtración por membrana es el paso del agua pretratada a través de una membrana activa de OI/NF con un tamaño de poro de 0.001 a 0.0001 μm . El postratamiento incluye muchas operaciones unitarias comunes al tratamiento de agua potable como aireación, desinfección, control de corrosión.

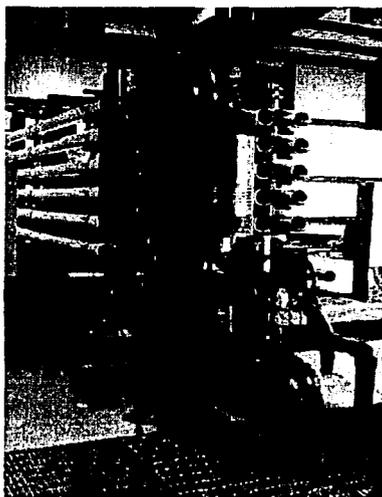


1. Tanque de agua bruta (precloración)
2. Estación de bombeo del pretratamiento.
3. Filtros de arena a presión
4. Estación de dosificación química (H_2SO_4 , anti-incrustante y NaHSO_3).
5. Edificio de OI.
6. Tanque de almacenamiento de agua de lavado.
7. Saturador de cal
8. Tanque de almacenamiento de cal.
9. Edificio de administración.

Figura 3.3 Vista general de disposición de la planta de OI.

Fuente: AWWA, Tratamiento del agua por procesos de membrana, McGraw-Hill, México, 1999.

En cuanto a operación de las plantas el desarrollo de membranas más eficientes e instrumentos de recuperación de energía redujo de forma significativa su costo, ya que por un lado las membranas permiten un mayor flujo por unidad de área, el rechazo de sales aumento, son más baratas, y tienen mayor tiempo de vida. En cuanto a la recuperación de energía, ésta se da por medio de aprovechar la presión con que sale el concentrado de la membrana pues sale con una presión de 1 a 4 bares menos que la presión aplicada por la bomba de alta presión. El elemento que hace esta recuperación de energía es uno mecánico y generalmente son turbinas o una bomba que pueda convertir una diferencia de presiones en energía rotatoria o de otro tipo para reducir las necesidades de energía dentro de todo el proceso. Esto es importante dado que reduciría los costos en una planta de gran escala ya que sus costos por suministro de energía se incrementan en proporción al tamaño de la misma y se han reportado valores de 3 kWh/m³ para plantas desaladoras de agua de mar de OI con sistemas de recuperación de energía, que son menores a los 5-7 kWh/m³ de plantas sin este sistema (Buros, 2000, p.16-19).



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 3.3 Unidad de bombeo de una Planta OI.

Fuente: The ABC's of Desalting by O. K. Buros.

En todos los procesos de membrana de agua potable habrá una corriente de alimentación entrante al proceso y dos corrientes de salida abandonando el proceso: una de las corrientes será concentrada y la otra restante es de producto. Por lo que el balance de masas para estos sistemas de una sola fase esta dado por la siguiente ecuación:

$$F = B + D \quad (1)$$

donde: F = agua de alimentación, m³/s

B = Concentrado, m³/s

D = Perneado, m³/s

Por otro lado el total del agua producida por la membrana está dada por:

$$J_p = D = N \cdot A^* \cdot S_m [P - \varepsilon(c_L - c_D)]g \quad (2)$$

donde: J_p = D = flujo del perneado, m³/s

N = Número membranas

A* = Coeficiente de permeabilidad de agua pura, m/s/bar

S_m = Área efectiva de la membrana, m²

P = presión de operación, bar

ε = Coeficiente de la presión osmótica, bar/ppm

c_L = concentración en membrana, ppm

c_D = concentración del perneado, ppm

g = coeficiente de corrección de la membrana

Pero suponiendo que el sistema opera al máximo se toman las siguientes ecuaciones que simplifican bastante los cálculos.

Para el caso del valor máximo de alimentación a través de la membrana la ecuación es:

$$F = NF^{MAX} \quad (3)$$

donde: F = alimentación, m³/s

N = número de membranas

F^{MAX} = máximo flujo de alimentación por membrana, m³/s

Para el valor del concentrado utilizaremos el mínimo valor del concentrado que se produce en el proceso que está dado por:

$$B = NB^{MIN} \quad (4)$$

donde: B = flujo del concentrado, m³/s

N = Número de membranas

B^{MIN} = flujo mínimo de concentrado por módulo, m³/s

Estas ecuaciones simplifican los cálculos ya que F^{MAX} y B^{MIN} son datos que proporciona el fabricante y por lo tanto podemos obtener el valor del permeado con un simple despeje de la ecuación (1).

$$D = F - B \quad (5)$$

La potencia para la presurización del agua de alimentación se obtiene con:

$$P_p = \frac{F \cdot \Delta P}{\eta_p} \quad (6)$$

donde: P_p = Potencia de la bomba de alta presión, W

F = Flujo de alimentación, m³/s

ΔP = Diferencial de presiones a través de la membrana, bar

η_p = Eficiencia de la bomba

La potencia recuperada por la hidroturbina se calcula por:

$$P_T = B \cdot \Delta P \cdot \eta_T \quad (7)$$

donde: P_T = Energía recuperada por la hidroturbina, W

B = Flujo del concentrado, m³/s

ΔP = Diferencial de presiones a través de la membrana, bar

η_T = Eficiencia de la hidroturbina

La energía total a suministrar ya sea con energía convencional o renovable está dada por:

$$P_R = P_P - P_T \quad (8)$$

donde: P_R = Energía requerida por la planta de OI, W

P_P = Energía de la bomba de alta presión, W

P_T = Energía recuperada por la hidroturbina, W

Con estas ecuaciones calcularemos el número de membranas que se necesitan para cualquier demanda de agua potable a producir, y la energía requerida para bombear el agua de alimentación al diferencial de presión que requiera el proceso, la energía recobrada por la hidroturbina la cual se acoplaría directamente a la bomba y el total de energía requerida por la planta de ósmosis inversa.

Capítulo 4

Celdas Fotovoltaicas.

Como este trabajo pretende dar como opción de fuente de energía al proceso de ósmosis a la energía solar y para tal efecto proponer el uso de celdas fotovoltaicas, ya que generan electricidad de forma directa, que es el tipo de energía que demanda el proceso, y por lo tanto en este capítulo hablaremos de la energía solar y las generalidades de las celdas fotovoltaicas.

Energía Solar.

La Tierra recibe energía del sol a razón de 10^{16} kJ por minuto y en un período de 24 horas la tierra recibe alrededor de $7.2 * 10^{18}$ kJ/d, si se utilizara un 1% de esta energía, ésta equivaldría a $1.65 * 10^2$ veces la energía, que se estima, requeriría todo el mundo en un año (Sayigh, 1991, p.5).

El valor de dicha radiación afuera de la atmósfera terrestre es de 1367 W/m^2 , que corresponde a la constante solar, y conforme va entrando a la atmósfera la gran mayoría es absorbida por el ozono, monóxido y dióxido de carbono y partículas de agua que en su conjunto son llamadas masa de aire, cuyo espesor varía conforme la hora del día, la estación del año, la latitud y altitud del lugar. Debido a que es gran cantidad de energía la que se recibe del sol se pensó, desde hace muchos años, en como hacer para aprovechar esa energía por lo que se empezaron a construir dispositivos que convirtieran la luz solar en energía útil para el hombre. Los primeros dispositivos transformaban la energía solar en térmica y el posterior descubrimiento del efecto fotovoltaico introdujo un dispositivo, llamado celda fotovoltaica, que transformaba la luz solar en electricidad de forma directa, la cual se fue perfeccionando y transformando a la que conocemos actualmente, cuyos estudios siguen llevándose a cabo para permitir una mejor eficiencia y menor costo.

Dado que el desempeño de la celda está directamente relacionado con la cantidad de energía solar disponible en el sitio donde se coloca, entre mayor sea dicha cantidad de energía mayor será la cantidad de electricidad que se genere por área de celda. Para cuantificar dicha energía se definieron ángulos y otros conceptos que a continuación se presentan (Sayigh, 1991, p. 8-14).

Ángulo de Declinación. δ . Este ángulo lo crean los rayos del sol con el plano ecuatorial. Este ángulo varía de $+23.45^\circ$ en Junio 21, a 0.0° en Septiembre 21, y de -23.45° en Diciembre 21, a 0.0° en Marzo 21. La siguiente fórmula matemática expresa el ángulo de declinación en cualquier día del año:

$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen}\left(\frac{360}{365.24}\right) \cdot (n + 284)$$

Período Solar. En cualquier localidad este se define como el tiempo en el cual la línea que va desde el centro de la Tierra al sol pasa a través del meridiano que contiene a la localidad.

El ángulo horario. ω . Es el ángulo del arco a lo largo del ecuador, que se forma entre el meridiano que contiene la localidad, o punto P, y el meridiano que contiene la línea OQ, que es la que va desde el centro de la Tierra hasta el sol. Este ángulo puede ser expresado en horas a razón de una hora por 15° y la ecuación que lo describe es:

$$\omega = (120 - t) \cdot 15^\circ$$

donde t = tiempo local solar en horas

Ángulo zenith θ_z . También le llaman el ángulo de inclinación, y es el ángulo entre el sol y una línea vertical en el punto P. Este ángulo depende de la hora del día, el día del año y la posición de la localidad.

$$\text{Cos } \theta_z = \text{Cos } \delta \text{ Cos } \varphi \text{ Cos } \omega + \text{Sin } \varphi \text{ Sin } \delta$$

donde φ es el ángulo de latitud, que es el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que pasa por el punto P desde el centro de la Tierra.

Ángulo de altitud. Este es el ángulo entre la dirección de el sol y la horizontal. Es el ángulo complementario del ángulo zenith.

Ángulo de puesta de sol, este ángulo indica la duración del día y puede ser expresado con la relación:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta$$

La duración del día esta dada por:

$$T = \left(\frac{2}{15} \right) \omega_s$$

La radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal, en cualquier momento esta dada por la ecuación:

$$G_o = 1367 \left[1 + 0.033 \cdot \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z$$

donde: n es el día del año, tomando al 1º de enero como 1, y θ_z es el ángulo zenith.

La irradiancia directa sobre una superficie, depende de la orientación que tenga la superficie en cuestión respecto a la dirección de propagación de la radiación. Por lo tanto la intensidad de radiación sobre una superficie dependerá del ángulo θ_T , o ángulo de incidencia, que es el ángulo que forma la normal de la superficie con respecto a la dirección de propagación de la radiación. Este ángulo se calcula con:

$$\cos \theta_T = \text{Sen} \delta \text{ Sen} (\varphi - \beta) + \cos \delta \cos (\varphi - \beta) \cos \omega$$

donde β es el ángulo que forma la superficie inclinada con el piso.

El cálculo de la radiación directa esta dado por:

$$G_b = G_{bn} \cos \theta_z$$

donde: G_b = radiación directa

G_{bn} = radiación directa de incidencia normal

La radiación directa sobre un plano inclinado se obtiene con:

$$G_{bT} = \cos \theta_T G_{bn}$$

La irradiancia incidente sobre la superficie será:

$$G_{hr} = G_{bn} \cdot \frac{\cos \theta_r}{\cos \theta_z}$$

donde G_{hr} es la irradiancia sobre un plano con cualquier inclinación.

G_{bn} es la irradiancia sobre un plano normal a la dirección de propagación de la radiación.

CELDA FOTOVOLTAICAS.

La conversión de energía solar en electricidad por celdas fotovoltaicas es una de las más prometedoras aplicaciones de las energías renovables hoy en día y su desarrollo se ha venido incrementado significativamente. Fue en Francia en el año de 1839 donde se descubrió el principio del efecto fotovoltaico por A. C. Bequerel (1788-1878), pero tomaría más de 100 años desarrollar celdas solares para aplicaciones prácticas, de hecho el primer uso comercial de las celdas fue en 1954, cuando se utilizaron en un satélite, y el costo en ese momento fue de \$1000/W_p, ahora un sistema instalado se puede comprar por \$6/W_p. De hecho la producción aumento de 20 kW en 1954 a 50 MW en 1990 y alcanzó una producción de 2000 MW para el año 2000. Dentro de las celdas fotovoltaicas las más desarrolladas son las de cristales de silicio amorfo cuyo costo es de alrededor de \$1.5/W_p.

El rápido desarrollo de las celdas fotovoltaicas se debió al inicio de la era espacial en los 50's, ya que se tuvo la necesidad de suministrar energía a los satélites los cuales iban a estar años en órbita, se pensó entonces que dicha energía podría provenir de la luz solar, cuya transformación la harían las celdas fotovoltaicas. En 1958 fue puesto en órbita el American Vanguard I al cual se le acoplaron seis grupos de celdas de silicio para transmitirle 5mW de potencia, a partir de ese momento prácticamente cada satélite puesto en órbita para cualquier propósito es energizado por celdas fotovoltaicas y de hecho gracias a éstas ha sido posible la exploración del espacio. Desde 1960 hasta 1975 la producción de celdas fotovoltaicas había sido exclusivamente para fines espaciales y era de unos 100 kW por año. En 1987 los módulos para aplicaciones terrestres alcanzaron una producción de 28.6 MW, éstos se aplican en telecomunicaciones, protección catódica, bombeo de agua,

electrificación rural, instrumentación, alarmas y productos de consumo (Treble, Sayigh, 1991, p.1-3).

Pero ¿Cómo tiene lugar el efecto fotovoltaico? Pues bien, cuando la luz del sol cae sobre una celda solar, el material de la misma absorbe algunas de las partículas de luz, denominadas fotones. Cada fotón contiene una pequeña cantidad de energía. Cuando un fotón es absorbido, se da inicio a un proceso de liberación de un electrón en el material de la celda solar. Dado que ambos lados de una celda solar están eléctricamente conectados por un cable, una corriente fluirá en el momento en que el fotón es absorbido. Es por esto que mientras las celdas solares permanecen expuestas a la luz, este proceso de liberación de electrones continua y, por ende, el proceso de generación de electricidad. Los materiales capaces de generar este efecto fotovoltaico son los denominados semiconductores. En un proceso de producción especial, las celdas solares son fabricadas de estos materiales semiconductores que convierten directamente la luz solar en electricidad. Hoy en día, la mayor parte de celdas solares utilizadas a nivel comercial son de silicio (Si). El silicio es lo que se conoce como un semiconductor. Este elemento químico se encuentra en todo el mundo bajo la forma de arena, que es dióxido de silicio (SiO_2), también llamado cuarcita. Otra aplicación del silicio semiconductor se encuentra en la industria de la microelectrónica, donde es empleado como material base para los chips.

Las celdas solares de silicio pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. La diferencia entre ellas radica en la forma como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina. Existe, además, una diferencia en la eficiencia. Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino tienen casi el mismo y más alto nivel de eficiencia con respecto a las de silicio amorfo.

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior y, luego, dos capas de silicio. En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antireflexión, que da a la celda solar su típico color azul.

Durante la última década, se ha estado desarrollando nuevos tipos de celdas solares de materiales diversos, entre las que encontramos, por ejemplo, a las celdas de película delgada y a las celdas de CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (teluro de cadmio), éstas están comenzado a ser comercializadas.

Eficiencias de celda:	
Monocristalina:	12-15 %
Policristalina:	11-14 %
Amorfa:	6-7 %
Teluro de Cadmio:	7-8 %

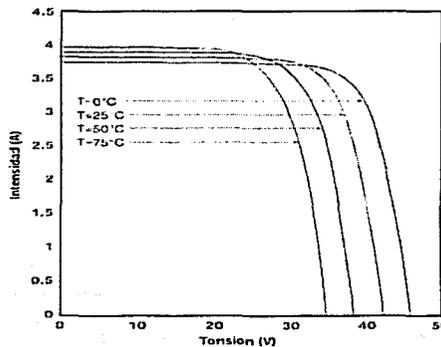
Tabla 4.1 Eficiencia de los diferentes tipos de celdas fotovoltaicas

La eficiencia de los paneles solares disponibles en el mercado fluctúa entre 5-15%. Esto significa que 5-15% de la energía de toda la luz solar que llega a la celda será, en efecto, transformada en electricidad. Los laboratorios de investigación en todo el mundo están desarrollando nuevos materiales con eficiencias mayores (hasta 30%). Los costos de producción son igualmente importantes. Algunas nuevas tecnologías (tales como las celdas de película delgada) permiten la producción a gran escala, lo que reduciría significativamente su costo. La celda solar genera, entonces, electricidad, que puede ser utilizada inmediatamente o almacenada en una batería. Un panel solar puede producir energía limpia por un periodo de 20 años o más. El desgaste se debe, principalmente, a la exposición al medio ambiente. Un panel solar montado apropiadamente constituirá una fuente de energía limpia, silenciosa y confiable por muchos años.

Dado que una sola celda solar no produce energía suficiente para la mayor parte de aplicaciones, se les agrupa en paneles solares, de modo que, en conjunto, generan una mayor cantidad de electricidad. Los paneles solares (también denominados módulos fotovoltaicos o PV) son fabricados en diversas formas y tamaños. Los más comunes son los de 50 Wp (Watt pico), que producen un máximo de 50 Watts de electricidad solar bajo condiciones de luz solar plena, y que están compuestos por celdas solares de silicio. Dichos paneles miden 0.5 m² aproximadamente. Sin embargo, se puede escoger entre una amplia variedad de paneles más grandes y más pequeños disponibles en el mercado. Los paneles solares pueden conectarse con el fin de generar una mayor cantidad de electricidad solar

(dos paneles de 50 Wp conectados equivalen a un panel de 100 Wp). Dentro de las ventajas que ofrecen las celdas fotovoltaicas, en comparación con otros dispositivos solares, es que trabajan satisfactoriamente incluso en días nublados y de hecho son más eficientes si trabajan a bajas temperaturas. También su rápido tiempo de respuesta a cambios repentinos en la radiación toma importancia en lugares donde la energía solar o la radiación es difusa debido a cielos con nubes.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva IV) o de potencia contra voltaje (curva PV) que los caracteriza. La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. Bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia de 1 kW/m^2 y temperatura de celda de $25\text{ }^\circ\text{C}$), cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica. En la curva de potencia contra voltaje, la potencia máxima (P_{mp}) es la capacidad nominal o tamaño de módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (I_{mp} y V_{mp}) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente. Otros parámetros de importancia son la corriente de corto circuito (I_{sc}) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}). Es importante notar que cuando opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia entregada se reduce significativamente.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1 Curvas I vs. V de BP-SX120.
Fuente: www.bpsolar.com

La potencia máxima de los módulos comerciales varía entre 40 y 300 watts. El voltaje nominal de la mayoría de los módulos fluctúa entre los 16 y 17.5 voltios. Las características eléctricas del módulo cambian con la irradiancia que reciben y la temperatura de operación de las celdas. Dado que el voltaje no es afectado significativamente, la potencia nominal también es proporcional a la irradiancia. El voltaje si se ve afectado por la temperatura de celda, y este efecto es menos pronunciado que el de la irradiancia. Es típico que la potencia nominal se reduzca aproximadamente 0.5% por cada grado Celsius que las celdas operen por encima de 25 °C. Estos efectos se toman en consideración cuando se diseñan los sistemas. Cuando operan cerca de su punto de potencia máxima, los módulos cristalinos comerciales tienen una eficiencia de aproximadamente 13%. Esto significa que 13% de la irradiancia efectiva que incida en su superficie es transformada en potencia eléctrica. Los módulos amorfos tienen una eficiencia menor (STD1, 2002, p-2-6).

Un arreglo fotovoltaico es un conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie y paralelo. Los arreglos tienen las mismas cualidades eléctricas que los módulos individuales, pero con los parámetros de potencia, corriente y voltaje a escala de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo. Los módulos conectados en serie forman una hilera, y determinan el voltaje nominal del arreglo:

$$V_{mp} \text{ del arreglo} = (V_{mp} \text{ de cada módulo}) \times (N^{\circ} \text{ de módulos en serie})$$

El número de hileras conectadas en paralelo determinan la corriente nominal de cada módulo:

$$I_{mp} \text{ del arreglo} = (I_{mp} \text{ de cada módulo}) \times (N^{\circ} \text{ de hileras en paralelo})$$

Por último, la potencia nominal del arreglo es la suma de la potencia nominal de cada módulo:

$$P_{pm} \text{ del arreglo} = (P_{pm} \text{ de cada módulo}) \times (N^{\circ} \text{ de módulos en el arreglo})$$

En la práctica es posible estimar la energía eléctrica (kWh/día) que se espera de un arreglo de cierta potencia nominal utilizando las siguientes aproximaciones:

1. Los módulos fotovoltaicos instalados en una estructura anclada al suelo trabajan aproximadamente a 55 °C durante el día, 30 °C por encima de las condiciones estándares de prueba (25 °C). Esto significa que la capacidad real del arreglo es aproximadamente 15% menor que su potencia nominal. Es decir, su capacidad real es 85% de la capacidad nominal.
2. La energía eléctrica (kWh) esperada es el producto de la capacidad real del arreglo (en kW) por la insolación (en horas solares pico) al ángulo de elevación del arreglo. La energía fotovoltaica generada varía con la época del año, de acuerdo a los cambios en los niveles de insolación.
3. Si se usa un seguidor azimutal, la energía disponible aumenta en un 20%. La variación de la inclinación de los módulos ayuda a maximizar la captación de la energía solar en las diferentes estaciones del año (STDI, 2002, p.6).

La conexión en serie o en paralelo va a depender de la necesidad de producir un máximo voltaje o producir la máxima corriente posible. En una conexión en serie se obtienen altos voltaje, mientras que una conexión en paralelo produce altas corrientes. Por lo tanto en serie lo que se desea es obtener el voltaje máximo al que trabaja cada módulo y el arreglo tenga una misma corriente. Cuando los módulos están en paralelo, se pretende que cada módulo trabaje a su corriente máxima con el mismo voltaje en todo el arreglo. Lo anterior es importante porque al hacer la conexión si ésta es en serie cada módulo tendrá que llevar un diodo que sirve como válvula bypass, ya que si dentro del arreglo un módulo falla con el diodo la energía pasará “brincando” al módulo que está mal y así no afectar el funcionamiento del arreglo. Para la conexión en paralelo se coloca un diodo por bloque, y éstos a su vez están conectados en serie, de tal forma que si un módulo o una serie de éstos falla, el diodo asegurará el funcionamiento del arreglo y no permite que los módulos o módulo que está fallando absorba la energía del resto del arreglo (Messenger, Ventre, 2000, p.50).

Como en toda instalación eléctrica, en un arreglo fotovoltaico, hay que tener en consideración puntos técnicos importantes como el calibre de los conductores y el sistema de puesta a Tierra. El calibre de los conductores debe ser el adecuado para que la caída de voltaje no exceda el 3% en cualquier punto a la corriente nominal del sistema. Ningún conductor primario del sistema podrá tener un calibre menor al 12-AWG de cobre, con aislamiento nominal de 90°C. Todo conductor expuesto a la intemperie deberá ser identificado como resistente a los rayos solares, al agua y al calor, como el tipo USE-2 (cable monoconductor para acometida subterránea, tipo 2). Todas las conexiones y empalmes del sistema deben estar en cajas de conexión a prueba de lluvia (STDI, 2002).

El sistema de puesta a tierra debe ser conectado al conductor negativo del circuito fotovoltaico. La varilla debe ser de acero con revestimiento de cobre como electrodo, de por lo menos 3 m de longitud y enterrada firmemente lo más cerca posible del arreglo fotovoltaico. Todas las partes metálicas expuestas del sistema (marcos de cada uno de los módulos, estructura de montaje, bomba y gabinetes de controles asociados) también deben ser conectadas al sistema de puesta a tierra. Todos los conductores de puesta a tierra deben ser de calibre 8-AWG de cobre o mayor.

El mantenimiento requerido por un sistema fotovoltaico es mínimo. Para realizar cualquier tipo de mantenimiento, es necesario seguir cuidadosamente procedimientos recomendados por el vendedor o el fabricante del equipo. Parte del mantenimiento lo puede hacer el propietario u operador del sistema. Sin embargo algunas acciones requieren personal y equipo especializado, tales como detección y corrección de fallas eléctricas en el controlador y arreglo. Es necesario que el vendedor y el propietario definan claramente las responsabilidades y términos del mantenimiento del sistema. El manual de operación y mantenimiento debe incluir solamente acciones de mantenimiento que el propietario puede realizar sin poner en peligro su seguridad y la integridad del sistema.

Dentro del mantenimiento rutinario de un sistema fotovoltaico está mantenerlo libre de sombra y polvo, ambos factores pueden reducir significativamente el desempeño del sistema. Inspecciones visuales del arreglo, las cuales pueden revelar deterioro de partes del mismo que pueden corregirse antes de que ocurran daños mayores.

Los problemas más comunes son conductores flojos o con aislantes deteriorados, corrosión e integridad de las estructuras de montaje, invasión de insectos en las cajas del sistema y corrosión del sistema de aterrizado. Si se sospecha que hay problemas en el sistema, es recomendable apagar el sistema y llamar al proveedor o personal calificado. Algo muy importante es tomar medidas de precaución en reparación para condiciones climáticas extremas como huracanes e inundaciones. El montaje del arreglo debe estar bien hecho contra vientos fuertes (STDI, 2002).

CAPÍTULO 5.

Planta propuesta.

Se propone una planta desalinizadora que opere con el proceso de ósmosis inversa y que a la vez sea energizada por un arreglo de celdas fotovoltaicas, la cual se localice en cualquiera de los estados siguientes: Baja California, Baja California Sur o Sonora, la selección final la determinará un estudio de la calidad del agua de mar en estos Estados ya que esto permitirá definir el pre-tratamiento que necesita el agua para ser procesada y por consiguiente definirá parte del costo total del proyecto. Por lo tanto a continuación se muestran los cálculos que nos permitirán tener una idea general de dicha planta.

Para comenzar se calcula la producción de una membrana con los siguientes datos, correspondientes a la membrana DuPont B-10 (6840):

$$\begin{aligned}\Delta P &= 60[\text{bar}] \\ F^{\text{MAX}} &= 460\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right] = 0.00046\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] \\ B^{\text{MIN}} &= 300\left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}\right] = 0.0003\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]\end{aligned}$$

De la ecuación 3.5

$$D = F - B = 0.00046 - 0.0003 = 0.00016\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]$$

esto es lo que produce una membrana, ahora si se opera por seis horas al día obtenemos:

$$D = 0.00016\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] \cdot \left[\frac{60\text{s}}{1\text{min}}\right] \cdot \left[\frac{60\text{min}}{1\text{hr}}\right] \cdot \left[\frac{6\text{hr}}{1\text{día}}\right] = 3.456\left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right]$$

Si suponemos un arreglo de diez membranas obtendremos una producción diaria de

$$D = 3.456\left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right] \cdot 10 = 34.56\left[\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right] = 34560\left[\frac{\text{l}}{\text{día}}\right]$$

Para dicho arreglo calculamos los flujos de alimentación, concentrado y producto con las ecuaciones 3.3 – 3.5.

$$\begin{aligned}F &= NF^{\text{max}} = 10 \times 0.00046\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] = 0.0046\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] \\ B &= NB^{\text{min}} = 10 \times 0.0003\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] = 0.0030\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right] \\ D &= F - B = 0.0046 - 0.0030 = 0.0016\left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right]\end{aligned}$$

La potencia requerida por la bomba está dada por la *ecuación 3.6*, asignando una eficiencia de la bomba $\eta_p = 70\% = 0.7$

$$P_p = \frac{F\Delta P}{\eta_p} = \frac{0.0046 \left[\frac{m^2}{s} \right] \cdot 60 \times 10^5 [Pa]}{0.7} = 39428.57 [W] = 39.4 [kW] \approx 40 [kW]$$

$$\left[\frac{m^2}{s} \right] \cdot \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right] = \left[\frac{kg \cdot m^2}{s^3} \right] = \left[\frac{J}{s} \right] = [W]$$

La potencia que se recobraría con una turbina accionada por el flujo de rechazo o flujo de concentrado se obtiene de la *ecuación 3.7*, con una eficiencia de la turbina de $\eta_T = 70\%$

$$P_T = B\Delta P \eta_T = 0.003 \left[\frac{m^2}{s} \right] \cdot 60 \times 10^5 [Pa] \cdot 0.7 = 12600 [W] = 12.6 [kW]$$

Por lo que la energía total a suministrar al sistema queda definida por la *ecuación 3.8*

$$P_R = P_p - P_T = 40 [W] - 12.6 [W] = 27.4 [kW]$$

Esta energía va a ser proporcionada por celdas fotovoltaicas, de las cuales se seleccionó para hacer este cálculo las producidas por la Compañía British Petroleum, modelo BPSolar SX120, cuyas características son:

Potencia máxima	$P_{m\acute{a}x} = 120 \text{ W}$
Tensión de $P_{m\acute{a}x}$	$V_{mp} = 33.7 \text{ V}$
Intensidad de $P_{m\acute{a}x}$	$I_{mp} = 3.56 \text{ A}$
*NOCT	$47 \pm 2^\circ\text{C}$
$P_{m\acute{a}x}$ mínima garantizada	110 W

*NOCT = Temperatura Nominal de Trabajo de la Celda.

La temperatura de trabajo se calcula con:

$$T_M = T_{\Delta MB} + (NOCT - 20)$$

Si se supone una $T_{\Delta MB} = 30^\circ\text{C}$ como promedio anual tenemos que la temperatura de trabajo de la celda es:

$$T_M = 30 + (47 - 20) = 57^\circ\text{C}$$

Para calcular la eficiencia a la cual está trabajando la celda tenemos que en condiciones estándar la celda opera a una temperatura ambiente de 25°C y una radiación de 0.8 kW/m², por lo que si la temperatura de trabajo es de 57°C entonces la celda opera a 32°C más que en condiciones estándar y si pierde 0.5% de la eficiencia por cada grado Celcius arriba de 25°C entonces su eficiencia es:

$$32 \times 0.5 = 16\%$$

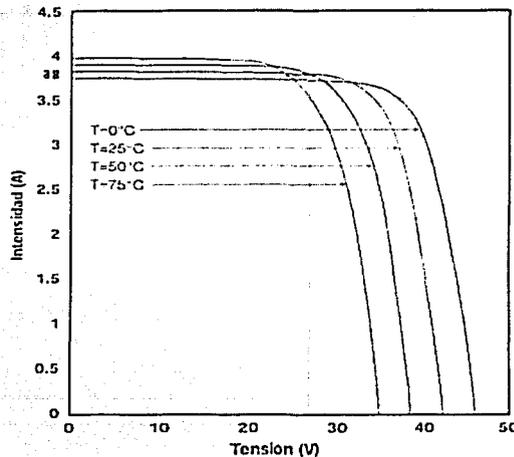
$$\therefore \eta = 84\%$$

Entonces:

$$V_{mp} = 33.7[V]$$

$$V_{real} = 33.7 \times 0.84 = 28.3[V]$$

con este valor se observa en la gráfica siguiente que $I = 3.8$ A



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Por lo que:

$$P_{real} = 28.3 \times 3.8 = 107.5[W] = 0.1075[kW]$$

Con los datos obtenidos anteriormente obtendremos el número de celdas que constituirán el arreglo fotovoltaico que está dado por:

$$N^{\circ} \text{ de celdas} = \frac{P_R}{P_{real}} = \frac{27.4}{0.1075} = 254.8 \approx 255 \text{ celdas}$$

esto sería si las celdas entregarán CA pero como entregan CD entonces necesitamos de un inversor de corriente cuya eficiencia es $\eta=0.96$ por lo que cada celda genera en CA

$$P_{real\,CA} = P_{real} \times \eta_{inv.} = 0.1075[kW] \times 0.96 = 0.1032[kW]$$

por lo tanto el número de celdas es:

$$N^{\circ} \text{ de celdas} = \frac{P_R}{P_{real\,CA}} = \frac{27.4}{0.1032} = 265.5 \approx 266 \text{ celdas}$$

Sin embargo el fabricante garantiza una Potencia máxima de $P_{max} = 110 \text{ W}$ por lo que el número de celdas BP SX 120 es de:

$$P_{real\,CA} = P_{real} \times \eta_{inv.} = 0.11[kW] \times 0.96 = 0.1056[kW]$$

$$\therefore N^{\circ} \text{ de celdas} = \frac{P_R}{P_{real}} = \frac{27.4}{0.1056} = 259.5 \approx 260 \text{ celdas}$$

Si la planta operara sin sistema de recuperación de energía se requerirían, entonces:

$$N^{\circ} \text{ de celdas} = \frac{P_R}{P_{real}} = \frac{40}{0.1056} = 378.7 \approx 379 \text{ celdas}$$

Con estos cálculos se concluye que lo más conveniente es utilizar una planta con sistema de recuperación de energía ya que disminuye significativamente el número de celdas a utilizar, lo que disminuye de igual manera el costo de inversión inicial de este rubro. La utilización de celdas para energizar la planta es atractiva desde el punto de vista de que se tiene un suministro de energía limpia, el cual dura por lo menos veinte años, cuyo mantenimiento es mínimo en comparación con otros sistemas de suministro de energía, lo que ayuda a disminuir gastos de operación en la planta.

Para finalizar en el aspecto económico se obtuvo un artículo que habla de un software el cual permite hacer un análisis económico de una planta con dichas características, en este artículo se publican los costos de inversión y operación de una planta desalinizadora que produce $1,000 \text{ m}^3/\text{d}$, y se consideran los procesos de ósmosis inversa y compresión de

vapor, y como fuentes alternas de energía la eólica y la solar, los resultados se muestran en las siguientes tablas.

Proceso	Inversión inicial (€/m ³)	Consumibles (€/m ³)	Operación (€/m ³)	Mantenimiento (€/m ³)
Osmosis Inversa	1600	0.25	0.2	0.05
Compresión de Vapor	2500	0.15	0.2	0.08

Tabla 5.1 Costos de inversión y operación de una planta desalinizadora.

Fuente: A tool for the design of desalination plants powered by renewable energie, D. Vioventas et al., Desalination 133 p.175-198, Elsevier Science B. V. 2001, Netherlands

Tecnología de energía renovable	Equipo (€/kW)	Instalación (€/kW)	Mantenimiento (€/kW)
Turbina de viento	750	500	32
Celda Fotovoltaica	4000	153	10

Tabla 5.2 Costos de inversión y operación de las tecnologías de energía renovable.

Fuente: A tool for the design of desalination plants powered by renewable energie, D. Vioventas et al., Desalination 133 p.175-198, Elsevier Science B. V. 2001, Netherlands

Si estos costos los hacemos válidos para la planta propuesta en este trabajo tenemos que la inversión inicial para producir 35m³/d, que demandan de 28-40 kW dependiendo si se tiene o no sistema de recuperación de energía, tendría que ser de €168,000 - € 216,000 que en pesos es de \$ 2,184,000 - \$2,808,000. Los otros gastos varían de € 4,581.5 - € 6,537.5 que equivalen a \$59,559.5 y \$84,987.5 respectivamente.

En la actualidad hay un proyecto que tiene contemplado construir plantas de ósmosis inversa con capacidades de 35m³/d, 40m³/d y 65 m³/d y se tiene estimado un monto de \$2,236,199 y \$2,621,938 por lo que las autoridades pudieran considerar que estas plantas en lugar de estar conectadas a la red eléctrica por lo menos parte de ellas utilizarán la energía solar ya que dichas plantas van a estar en Baja California Sur, beneficiando a las comunidades de Puerto Chale en el Municipio de La Paz, San Juanico en el Municipio de Comondu, y las localidades de Ejido Luis Echeverría, El Cardon, Campo Pachico, La Base, La Freidera en el Municipio de Mulenge, en todas estas comunidades la población no es mayor a los 350 habitantes.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO 6

Conclusiones.

Este trabajo concluye que el proceso de Ósmosis Inversa puede utilizar como fuente de energía a la energía solar, y para tal fin se propone un arreglo de celdas fotovoltaicas el cual consta de 266 módulos con una potencia de 120W cada uno. Esta cantidad de módulos se considera cuando la planta opera con un sistema de recuperación de energía, es decir con una hidroturbina acoplada a la bomba de alta presión, de lo contrario el número de módulos ascendería a 379. Los módulos seleccionados son los BP SX 120 de British Petroleum (ver apéndice).

Se propone que el proceso desalinizador sea el de ósmosis inversa ya que es el que menos energía requiere para su operación, con un consumo total de 5-7 kWh/m³, dependiendo la producción de la planta, y también por ser el proceso de menor impacto ambiental por operar a temperatura ambiente.

Dentro de las desventajas del proceso se tiene que la necesidad de un pre-tratamiento y post-tratamiento del agua incrementan los gastos de inversión, los cuales pueden alcanzar un 40%, esto depende de la calidad del agua de alimentación. La principal ventaja del proceso es la calidad del agua producida, que es excelente, hasta 50 ppm de SDT.

Otra desventaja es el deterioro que pueda tener la membrana al operar de forma intermitente, esto debido a que la planta opera solamente durante las horas en las que esté disponible la luz solar, dicho problema se puede solucionar con un sistema híbrido o con un banco de baterías.

Una planta desalinizadora de las características aquí mencionadas cubre las necesidades de agua potable de una población de 300 habitantes, suponiendo una cantidad de 120 l/d por persona o tendría más impacto si se abastecen sólo 20 l/d por persona de agua potable, cuyo uso se limita únicamente para alimentación, para este caso la población es de 1500 habitantes.

La localización de la planta se propone en la Península de Baja California Sur, ya que en ese Estado se tienen los tres factores que la justifican y son: la escasez de agua, acceso directo al mar y el recurso solar durante gran parte del año. De hecho en la información recabada para este trabajo se obtuvo que la CNA puso en marcha la construcción de tres plantas desalinizadoras en dicho Estado con características muy similares a la aquí propuesta, solo que operarán con energía convencional, lo cual se considera poco afortunado ya que el potencial de la energía solar en la región es enorme y su utilización en todo el proceso o en una parte del mismo garantizaría la obtención de agua potable con gran calidad y un impacto ambiental casi nulo, pues no se está contaminando al ambiente por emisiones atmosféricas y por otro lado el agua de desecho del proceso trae la misma cantidad de sales que contiene originalmente y no sale a una temperatura mayor que causen daños a la fauna del ecosistema marino, por lo tanto sería un proceso industrial amigable con el medio ambiente.

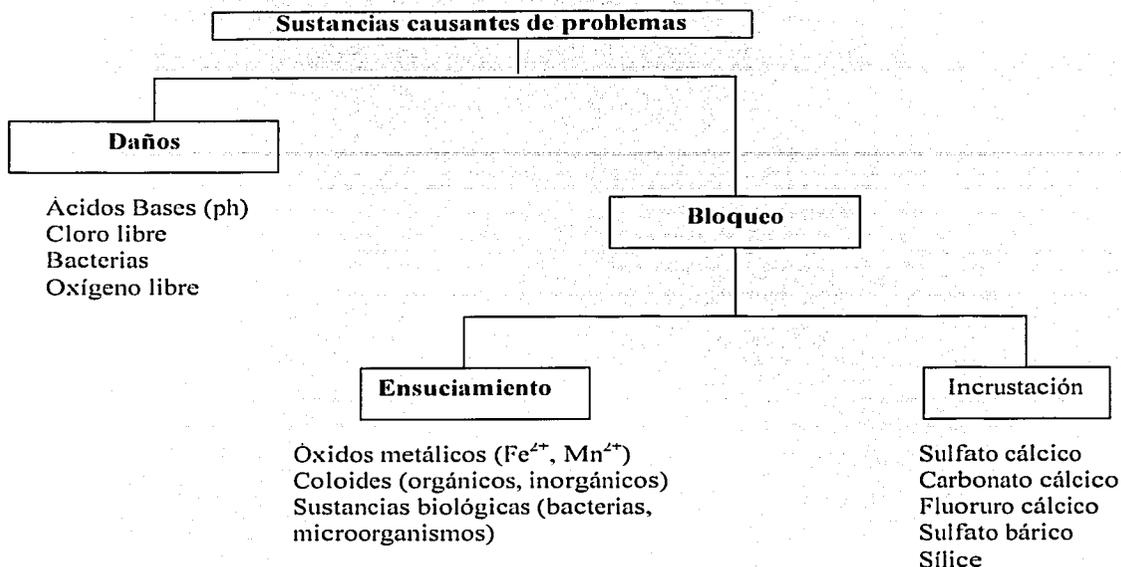
Por último cabe mencionar que plantas piloto de este tipo, Ósmosis Inversa – Energía Solar, están siendo operadas en países como España y Egipto, pero su producción es muy pequeña, apenas 10 l/d, y están en etapa experimental. En otros países, como los del Medio Oriente, se está estudiando la posibilidad de instalarlas en regiones remotas.

ANEXO

Terminología de membranas

Crudo, bruto	Corriente de entrada al proceso de membrana
Proceso convencional OI/NF	Sistema de tratamiento que consta de adición de ácido o anti-incrustante para control de incrustación (pretratamiento), filtrado por membrana OI/NF, aireación, cloración y control de la corrosión por postratamiento
Alimentación	Corriente de entrada al dispositivo de membrana
Concentrado, rechazo, retenido, corriente residual	Corriente de salida de la membrana que contiene mayor cantidad de SDT que la corriente de alimentación
Salmuera	Corriente de concentrado conteniendo una cantidad de SDT que la corriente de entrada.
Perneado o producto	Corriente de salida de membrana que lleva menor SDT que la corriente de alimentación.
Elemento de membrana	Una sola unidad de membranas conteniendo un mazo o grupo de membranas enrolladas en espiral o de forma de FFH para proveer un área superficial nominal.
Recipiente o vasija a presión	Un solo tubo que contiene varios elementos de membrana en serie.
Etapas o banco	Vasijas a presión en paralelo.
Dispositivo o tren	Etapas múltiples conectadas en serie.
Disposición de alta recuperación	Disposición donde se concentran corrientes de sucesivos dispositivos y está alimentada para sucesivas disposiciones con el fin de incrementar la recuperación.
Sistema de disposiciones	Varias disposiciones que producen el caudal requerido por la planta.
Rechazo	Reducción porcentual de la concentración del soluto de la corriente de perneado relativa a la corriente de alimentación.
Soluto	Sólidos disueltos en la corriente de bruto, alimentación, perneado y concentrado.
Flujo	Tasa de caudal de masa ($\text{mL}^{-2}\text{t}^{-1}$) o volumen (Lt^{-1}) de transferencia a través de la superficie de la membrana
Incrustación	Precipitación de sólidos en el elemento debido al soluto
Ensuciamiento	Deposición de material sólido existente en el elemento de la corriente de alimentación de la membrana.
Coefficiente de transferencia de masa (CTM)	Unidad de masa o volumen transferida a través de la membrana y producida por la fuerza actuante.

Sustancias potencialmente perjudiciales para las membranas.



Frecuencia típica de colección de datos en las plantas de OI

	Por turno de 8 horas	Diariamente	Semanalmente	Mensualmente
Presión: Sistema (por etapas)	X	X		
Vasijas a presión (muestra del puerto de concentrado)			X	X
Caudal	X	X		
Temperatura	X	X		
SDT: Sistemas (por etapas)	X	X		
Vasija a presión			X	X
Ph	X	X		
IDS	X	X		
Análisis de agua (alimentación, concentración, producto)				X
LSI (salmuera)			X	
Incidentes raros: cada vez que ocurran				

Aproximaciones del índice de ensuciamiento para OI

Índice de ensuciamiento	Rango
Índice de Ensuciamiento Modificado (IEM)	0-2 s/L ⁻²
Mini-índice del factor de cegado (MIFC)	0-3 x 10 ⁻⁵ L/s ²
Índice de densidad de sal (IDS)	0-2

Distribución de razones para seleccionar procesos de membrana

Trata	Nº	Trata	Nº	Trata	Nº	Trata	Nº
Bacterias	1	F	11	NO ₃	4	SO ₄	19
HCO ₃	1	Ablanda	17	M. orgánica	2	STD	100
Ca	5	Fe	11	Ra	16	THM	5
Cl	55	Mn	3	Na	19	Turbidez	2
Desala	6	Agua Bruta	1				

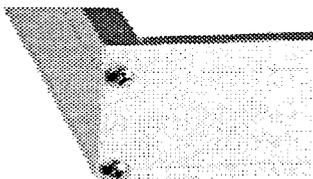


La serie SX de BP Solar proporciona alimentación fotovoltaica económica para uso general. Puede funcionar alimentando cargas de CC directamente, o en sistemas con inversores, cargas de CA con una potencia nominal máxima de 120 W. Sus 72 células en serie cargan baterías de 24V (o de múltiplos de 24V) de manera eficaz. El modelo BP SX 120 se utiliza principalmente en sistemas conexión a red, telecomunicaciones, desarrollo rural, bombeo y señalización terrestre.

Fabricación y materiales perfectamente probados

La experiencia en campo de un cuarto de siglo que posee BP Solar se manifiesta en todos los aspectos de los materiales y fabricación de este módulo:

- La resistencia del marco excede los requerimientos de los organismos de homologación;
- 72 células solares de silicio policristalino en serie con diodos de bypass instalados.
- Las células se laminan entre láminas de etileno acetato de vinilo (EVA) y vidrio templado de 3 mm, con bajo contenido en hierro y elevada transmisividad.



Marco universal anodizado transparente

Garantías limitadas

- Potencia de salida durante 20 años;
- Libre de defectos en materiales y mano de obra durante 1 año.

Consulte nuestra web o a nuestro distribuidor local para conocer los términos completos de estas garantías.

Caja de conexiones versátil de alta capacidad

La caja de conexiones es estanca (clase IP54) y acepta acoplamientos para cable o tubo nominal de PG13.5 o 1/2". Su volumen (411 cc. 25

pulgadas cúbicas) y bloque de 6 terminales permite la mayoría de las conexiones de configuración de sistemas (instalando los módulos en serie o en paralelo) para hacerse directas en la caja de conexiones. Las opciones incluyen:

- Bloque de conexiones sobredimensionado que acepta conductores de hasta 25 mm² (AWG #4); acepta terminales estándar de hasta 6 mm² (AWG #10);
- Regulador de carga Solarstate™.

Calidad y seguridad

- Fabricado en factorías homologadas con ISO 9001;
- Clasificado en Underwriter's Laboratories de seguridad eléctrica e incendio (clasificación de incendio Clase C)
- Homologada por TÜV Rheinland como equipo de Clase II para utilización en sistemas con tensión de hasta 1000V CC;
- Homologado por Factory Mutual Research para aplicaciones en ambiente exclusivo NEC Clase 1, División 2, Grupos C y D
- Cumple los requerimientos de IEC 61215, incluidos:
 - Ciclado repetitivo entre -40°C y 85°C a 85% de humedad relativa;
 - Impacto simulado de granizo de 25 mm de diámetro (una pulgada) a la velocidad final;
 - Prueba de "calor húmedo" (damp heat) consistente en 1000 horas de exposición a 85°C y 85% de humedad relativa;
 - Prueba de "punto caliente" (hot spot) que determina la capacidad del módulo para tolerar ensombrecimiento local (que puede producir una inversión de polaridad y calentamiento local);



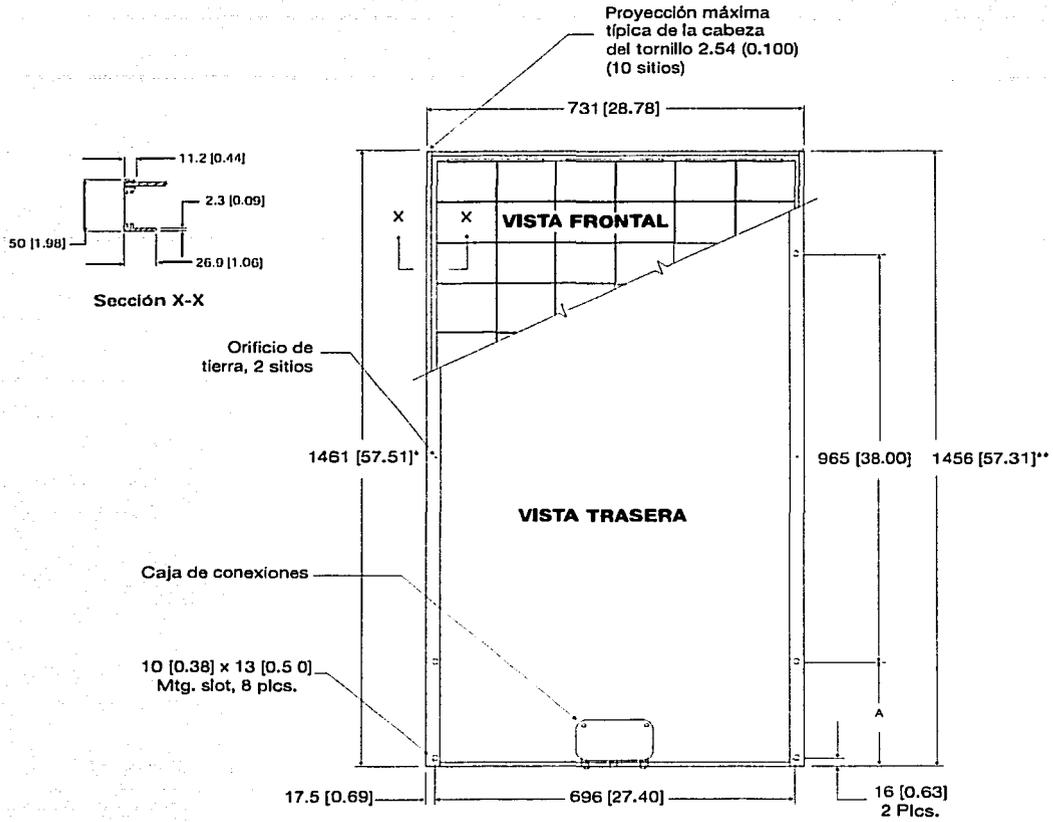
BP SX 120



- Carga estática, delantera y trasera, de 2400 Pa (50 psf); carga delantera (p.e. nieve) de 5400 Pa (113 psf).

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

PAGINACIÓN DISCONTINUA



BP SX 120

NOTA

*incluye la proyección de la cabeza del tornillo en cada extremo
 **no incluye la proyección de la cabeza

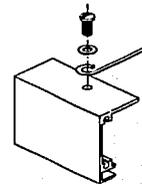
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Características mecánicas

Peso
 BP SX 120 12.8 kg (28.3 libras)

Dimensiones

Las dimensiones sin paréntesis están en milímetros.
 Las dimensiones entre paréntesis están en pulgadas.
 Tolerancias globales ±3 mm (1/8")



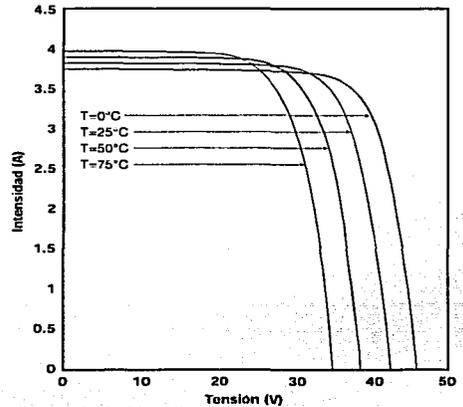
Detalle de la conexión a tierra

Características eléctricas típicas⁽¹⁾

	BP SX 110	BP SX 120
Potencia máxima (P_{max}) ⁽⁶⁾	110W	120W
Tensión de P_{max} (V_{mp})	32.9V	33.7V
Intensidad de P_{max} (I_{mp})	3.34A	3.56A
P_{max} mínima garantizada	100W	110W
Corriente de cortocircuito (I_{sc})	3.69A	3.87A
Tensión a circuito abierto (V_{oc})	41.2V	42.1V
Coefficiente de temperatura de I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Coefficiente de temperatura de V_{oc}	-(80±10)mV/°C	
Coefficiente de temperatura de la potencia	-(0.5±0.05)%/°C	
NOCT ⁽²⁾	47±2°C	
Tensión máxima del sistema ⁽³⁾	600V	

Notas

- Estos datos representan el funcionamiento típico de los módulos típicos medidos en sus terminales de salida y no incluyen el efecto de equipos adicionales tales como diodos o cables. Los datos se basan en mediciones realizadas de acuerdo con ASIM E1036 B5 corregida para SRC (Condiciones de Información Estándar, También conocida como STC o Condiciones de Prueba Estándar, que son:
 - Iluminación de 1 kW/m² (1 sol) a la distribución espectral de AM 1.5 (ASIM E1892 B7: radiación espectral global)
 - Temperatura de la célula de 25°C
- Durante el proceso de estabilización que se produce durante los primeros meses de despliegue, la potencia del módulo puede disminuir aproximadamente el 3% de la P_{max} típica.
- Las células de un módulo alumbrado operan más calientes que la temperatura ambiente. NOCT (Temperatura Normal de Trabajo de la Célula) es una indicación de este diferencial de temperatura, y es la temperatura de la célula en Condiciones de Trabajo Estándar: temperatura ambiente de 20°C, radiación solar de 0.8 kW/m² y una velocidad del viento de 1 m/s.
- Valor U.S. N.C.

Curvas I-V de BP SX 120

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA.

- F. Arreguin, et al., *Estado del arte de la desalinización del agua de mar y eliminación de sales y desinfectación del agua para consumo humano en zonas rurales, utilizando energía solar*, Informe Final del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México, 1998.
- Bart Van Der Bruggen, C. Vandecasteele, *Distillation Vs. Membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination*, Desalination 143, pp 207-218, Elsevier Science B. V., Netherlands, 2002.
- O. K. Buross, *The ABCs of Desalting*, 2nd Edition, International Desalting Association and Saline Water Conversion Corporation, USA, 2000.
- *Compendio básico del Agua*, Comisión Nacional del Agua, México, 2002.
- *Estadísticas del Agua en México*, Edición 2003, Sistema Unificado de Información Básica del Agua (SUIBA), Comisión Nacional del Agua, México, 2003.
- Glater, Julius, *The early history of reverse osmosis membrane development*, Desalination 117, pp 297-309, Elsevier Science B. V., Netherlands, 1998.
- Messenger, Roger, Ventre, Jerry; *Photovoltaic Systems Engineering*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 2000.
- Mustacchi, C. and Cena, V., *Technology for Solar Energy Utilization*, United Nations, New York, 1978, p.119-124, citado por Soteris Kalogirou, *Survey of solar desalination systems and system selection*, Energy Vol. 22, N° 1, p. 69-81, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1997.

- Mustacchi, C. and Cena, V., *Solar Desalination-Design, Performances, Economics*, Sogesta, 1981, citado por Soteris Kalogirou, *Survey of solar desalination systems and system selection*, Energy Vol. 22, N° 1, p. 69-81, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1997.
- Soteris Kalogirou, *Survey of solar desalination systems and system selection*, Energy Vol 22, N° 1, pp 69-81, Elsevier Science Ltd, Great Britain, 1997.
- Sayigh, A. A. M., Treble, F. C., *Generating Electricity from the Sun*, Renewable energy, Vol. 2, Pergamon Press, Oxford, England, 1991
- Southwest Technology Development Institute (STDI), *Bombeo de agua mediante sistemas fotovoltaicos*, México, 2002
- K. S. Spiegler and Y. M. El-Sayed, *A Desalination Primer*, Ed. K. S. Spiegler, USA, 1994
- Taylor et al., “Ósmosis Inversa”, *Tratamiento del agua por procesos de membrana*, American Water Works Association, McGraw-Hill, México, 1999.
- Voros, N. G., Kiranoudis C. T., Maroulis, Z. B.; *Solar Exploitation for reverse osmosis desalination plants*, Desalination 115, pp 83-101, Elsevier Science B. V., Netherlands, 1998.