

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA DESALINIZACIÓN Y POTABILIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA SOLAR

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. De Oliveira V., Arsenio J.
Sosa R., Fidel E.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA DESALINIZACIÓN Y POTABILIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA SOLAR

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ing. Rodolfo Berrios

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. De Oliveira V., Arsenio J.
Sosa R., Fidel E.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2001

De Oliveira V., Arsenio J.

Sosa R., Fidel E.

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA DESALINIZACIÓN Y POTABILIZACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍA SOLAR

Tutor Académico: Prof. Ing. Rodolfo Berrios

Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2001. 96 p.

Desalinización, Energía Solar, Potabilización, Destilación, Evaporación, Condensación, Vaporización.

Resumen: El propósito de este trabajo es desarrollar un modelo para la desalinización y potabilización de agua de mar aprovechando la energía solar. Se realizó un análisis termodinámico de las diferentes etapas del proceso. Se construyó el modelo de tipo simple de dos etapas y se le realizaron pruebas de producción y calidad del agua. Comparaciones realizadas con resultados existentes en la literatura muestran que el modelo construido es técnicamente satisfactorio en cuanto a la producción y la potabilidad del agua.

Dedicatoria

Arsenio:

Quiero dedicar este trabajo a
mis Padres Adalberto y Oneida,
y a mis hermanos Adalberto y Adrian

Fidel:

A mis mejores amigos,
mis padres (Xiomara y Pedro)
y hermana (Valentina),
los amo.

Agradecimientos

Muy especialmente a las siguientes personas
y/o entes que hicieron una contribución
directa para que este trabajo se llevara a cabo:

Prof. Ing. Rodolfo Berrios
Sra. Josefina Rivero
Carlo Cirrottola
Iván Rojas
Aserradero Tropical Parket
Kamal Bissessar
Ing. Roosevelt Rodríguez e Ing. Carlo Marquez
Ing. Adalberto de Oliveira
Libbero Iazzio
Sra. Xiomara de Sosa

Arsenio:

A Dios antes que nada y a las siguientes personas:
Padres y hermanos;
mi amigo Fidel junto con quien logré realizar esta obra;
toda mi familia;
mis amigos:
Kamal, Ismael, Alfredo, Alejandro, David,
Luciano; Juan Ruiz, Carlo Cirrottola, Iván,
Maria Alejandra, Roosevelt, Carlo (Charles),
Carlitos, Juan Carlos (Kurt), Daniel,
Juan (Juancho), Giulio;
Sra. Xiomara de Sosa y Dr. Pedro Sosa;
Sra. Clara de Días, Prof. Andrés Guzmán

Fidel:

A mi compañero Arsenio.
A mis amigos
Karina, Roosevelt, Carlitos y Charles
Kamal, David, Clemente y Alfredo.
A todos aquellos que han formado
parte importante de mi vida
Juan Rodrigo, Sergio,
Eleonor, Julieta, Laura,
y Claudio donde quiera que estés.
A mi familia.

*“Si la pobreza de mi ingenio,
mi escasa experiencia de las cosas presentes
y las incompletas noticias de las antiguas
hacen esta tentativa defectuosa y no de gran utilidad,
al menos enseñaré el camino a alguno
que con mas talento, instrucción y juicio
realice lo que ahora intento,
por lo cual si no consigo elogio,
tampoco mereceré censura”*

Nicolás Maquiavelo

Capítulo I Introducción.	-----1	
1.1	Introducción.	2
1.2	Motivación.	2
1.3	Planteamiento del problema.	3
1.4	Objetivos.	3
Capítulo II Fundamentos teóricos.	-----5	
2.1	Historia de la desalinización.	6
2.2	Métodos de desalinización.	7
2.3	Justificación del uso de la energía solar para el proceso.	14
2.4	Tecnologías existentes.	16
2.5	Radiación solar.	17
2.6	Agua y su calidad.	22
2.7	Mecanismos de transferencia de calor.	27
Capítulo III Diseño.	-----40	
3.1	Consideraciones.	41
3.2	Síntesis del modelo.	42
3.3	Especificaciones de los materiales.	45
3.4	Costos de fabricación.	59
3.5	Operación y Mantenimiento.	60
Capítulo IV Proceso de fabricación.	-----62	
4.1	La Estructura.	63
4.2	La Bandeja.	64
4.3	Cubiertas de vidrio.	66
4.4	Accesorios.	67
Capítulo V Principio termodinámico.	-----69	
5.1	Balance de energía.	70
5.2	Rendimiento.	76
5.3	Cálculo del espesor del aislante.	76
Capítulo VI Análisis Experimental.	-----80	
6.1	Instalación.	81
6.2	Puesta en marcha.	82
6.3	Ensayos.	83
6.4	Análisis de resultados	87
Capítulo VII Conclusiones y recomendaciones.	-----90	
Referencias bibliográficas.	-----93	

SIMBOLOGÍA

SÍMBOLOS

C_p : Calor específico a presión constante (J/Kg K)

E : Potencia emisiva (W/m²)

G : Irradiación (W/m²)

g : Aceleración gravitacional (m/s²)

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m²), Entalpía (J/Kg)

h_{fg} : Calor latente de vaporización (J/Kg)

h_m : Coeficiente de transferencia de masa por convección (m/s)

\dot{m} : Flujo másico (Kg/s)

n'' : Flujo de masa evaporativa

Pr : Número de Prandtl

\dot{Q} : Tasa de transferencia de calor

q'' : Flujo de calor (W/m²)

Re : Número de Reynolds

T : Temperatura (°C, K)

\dot{W} : Tasa de trabajo

Letras griegas

α : absorptividad

ε : emisividad

η : eficiencia

λ : longitud de onda (μm)

μ : viscosidad dinámica

θ : ángulo de inclinación

ρ : densidad de masa (Kg/m³), reflectividad

σ : constante de stefan-Boltzmann

τ : transmisividad

Subíndices

abs: absorbido

b: cuerpo negro

cond : condensación

conv: convección

e, ent: entrada

evap: evaporación

g: condiciones de vapor saturado

p: condiciones de placa

per: perdidas

rad: radiación

ref: reflejado

s: salida, condiciones de superficie

sal: salida

sat: condiciones saturadas

vc: volumen de control

λ : espectral

∞ : condiciones de corriente libre

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

La desalinización se refiere a un proceso de tratamiento del agua que extrae las sales de esta. La desalación o desalinización se puede lograr de muchas maneras diferentes, pero el resultado siempre es el mismo, se produce agua fresca a partir de agua salada o de mar.

Los destiladores solares han sido estudiados en aplicaciones para la desalinización de agua de mar, estos, en esencia, consisten en una superficie lisa ennegrecida en forma de bandeja con una cubierta transparente inclinada. El agua salada depositada en la bandeja es calentada por la energía solar, así el vapor de agua que se evapora desde el líquido es condensado en el lado interno de la cubierta transparente y el agua destilada fluirá a lo largo de la superficie de la cubierta por gravedad donde es recuperada en unos canales de recolección.

Generalmente las zonas localizadas en el trópico tienen un gran potencial de energía solar, este potencial puede ser aprovechado en el desarrollo de tecnologías de desalinización para que de esta manera las pequeñas comunidades costeras puedan enfrentar problemas de escasez de agua potable. Los sistemas de desalinización solar poseen bajos costos de operación y mantenimiento pero requieren de grandes áreas para su instalación.

En la actualidad la mayor parte de los modelos comerciales de sistemas de desalinización funcionan basados en métodos distintos a la destilación solar, se busca hacer competitivos mediante estos métodos la destilación solar, es decir si una planta de este tipo promedia 5 Lts/m² día requerirá de unos 4000 m² para producir unos 20.000 Lts/día.

1.2. MOTIVACIÓN

Es bien sabido que en muchos pueblos pequeños de las zonas costeras venezolanas y del caribe existe un problema con el suministro de agua potable, en ocasiones es solo

racionamiento del suministro y en otras simplemente no existe el servicio. En la actualidad existen técnicas de desalinización y potabilización moderna usando energía solar. Sabiendo que ambos recursos (sol y agua de mar) son naturales, renovables y abundantes, podría pensarse que una salida viable a este problema, es el desarrollo de estas técnicas de desalación. Con base en esta idea es que se desarrollara el siguiente trabajo.

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema nace de desarrollar una tecnología capaz de desalinizar agua de mar sin el uso de energía eléctrica o cualquier otro tipo de energía convencional (que involucra el consumo de combustible fósil), y que a su vez pueda competir económicamente con estos para luego ser implementada en pequeñas poblaciones costeras.

1.4. OBJETIVOS

Objetivo general:

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una tecnología capaz de desalinizar y potabilizar el agua de mar a bajo costo, con bajo impacto ambiental y de fácil mantenimiento mediante el uso de la energía solar.

Esto se logrará mediante el uso del proceso de destilación solar, luego se buscara la mejor aplicación de esta ajustándola a nuestra realidad, creando diseños que permitan abaratar y optimizar los procesos, finalizando con la construcción de un modelo.

Objetivos específicos:

Conseguir un uso practico y de bajo coste de la energía solar como fuente principal de energía para el proceso.

Lograr que la tecnología desarrollada ocasione el mínimo impacto al medio ambiente.

Desarrollar una tecnología que sea capaz de superar el promedio de producción de agua de $5\text{L}/\text{m}^2$ día para desalinizadores de tipo simple [20].

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. HISTORIA DE LA DESALINIZACIÓN

La destilación ha sido considerada por mucho tiempo como una forma de obtener agua potable de agua de mar y de purificar agua en locaciones remotas. A principios del siglo IV a.c., Aristóteles describió un método para evaporar agua contaminada y luego condensarla para su uso potable [10].

En los esfuerzos llevados a cabo por P.I. Cooper para documentar el desarrollo y usos de los destiladores solares, reportó que los alquimistas árabes hacia el siglo XVI fueron las primeras personas, de las que se tenga algún indicio, en usar destilación solar para la producción de agua potable. Pero la primera referencia documentada para un proyecto fue hecha por el italiano Nicolo Ghezzi en el año 1742 [10], de cualquier manera este solo llego a plantearlo de una manera conceptual mas nunca lo construyo.

El primer destilador solar moderno fue construido en Las Salinas, Chile en el año 1872 por Charles Wilson [7]. Constaba de 64 módulos (un total de 4459 m²) hechos de madera pintada en negro y con cubiertas de vidrios. Esta instalación solía suplir agua (20.000 litros al día) a las zonas mineras, donde era usada para el consumo por animales. Luego de que esta área fuera tomada para la construcción de líneas férreas, para la conexión con centros poblados, las instalaciones se fueron deteriorando aunque los destiladores continuaron en operación hasta 1912, 40 años después de su construcción. Este diseño ha servido de base para la mayoría de los destiladores construidos desde entonces.

El interés en la destilación fue tomado nuevamente en la década de 1950 al 1960, en todos los casos el objetivo era desarrollar grandes plantas descentralizadas. En California, el objetivo era desarrollar plantas capaces de producir un millón de galones diarios (3765m³) de agua destilada. Sin embargo, durante unos diez años, los investigadores alrededor del mundo concluyeron que las plantas de destilación solar de grandes proporciones eran muy costosas como para competir con las plantas que operaban con

combustible. Después de haber llegado a esa conclusión las investigaciones comenzaron a centrarse en el desarrollo de plantas de menor capacidad.

Entre 1960 y 1980, se construyeron 38 plantas en 143 países, con capacidades promedio que van desde cientos hasta los 30.000 litros de agua al día. De estas alrededor de un tercio ha sido desmantelada o abandonada debido al deterioro de los materiales usados en su construcción.

En California la compañía Solar Mc Cracken, continuaba sus esfuerzos para introducir al mercado destiladores solares para uso residencial. Debido al alto costo de la energía (combustible fosil) en 1979, el interés a nivel mundial respecto a las unidades destiladoras para uso residencial tomó un nuevo impulso.

En el presente la destilación solar no puede competir en costos con otros métodos , como la osmosis inversa, que usan combustible en sus procesos.

2.2. MÉTODOS DE DESALINIZACIÓN

La desalinización es un proceso continuo, natural y forma parte importante del ciclo hidrológico del agua. La lluvia cae sobre la tierra; una vez en la tierra el agua comienza un viaje hacia el mar, durante su trayecto los seres vivos utilizan esta agua para diferentes propósitos. Mientras el agua fluye sobre y a través de la tierra, disuelve minerales y otros materiales, haciéndose cada vez mas salada. Una vez que llega hasta los océanos o cualquier otro depósito natural, parte de esta agua es evaporada por la energía del sol. Esta agua evaporada deja atrás esa sal. Este vapor de agua formará luego nubes que se desplazarán sobre la superficie de la tierra y producirán lluvias, continuando así el ciclo.

2.2.1. TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACION

Un dispositivo de desalinización esencialmente separa agua salada en dos partes: una con baja concentración de sales disueltas (corriente de agua fresca) y otra que contiene el resto de las sales disueltas (el flujo concentrado o salmuera). El dispositivo requiere de energía para su funcionamiento y puede usar diversas maneras o tecnologías para la separación.

2.2.1.1.PROCESOS TERMICOS:

Destilación:

La destilación imita el ciclo natural del agua, en el que el agua salada es calentada, formándose vapor de agua que luego es condensado para producir agua fresca. En laboratorios o plantas industriales el agua es calentada hasta el punto de ebullición para conseguir la máxima cantidad de vapor de agua.

El punto de ebullición puede ser controlado, regulando la presión del líquido a ser bullido. La reducción del punto de ebullición es importante en la desalinización por dos razones principales: múltiples ebulliciones y control de las escalas de temperatura y presión.

Para hervir, se necesita que el agua tenga dos condiciones básicas, la temperatura adecuada relativa a su presión ambiental y suficiente energía para la vaporización.

Para reducir significativamente la cantidad de energía necesaria para la vaporización, el proceso de desalinización por destilación usualmente se realiza mediante ebulliciones sucesivas en recipientes consecutivos, cada uno operando a menor presión y temperatura. Este proceso de reducir la presión ambiental para ayudar a la ebullición puede

seguir hasta que se alcancen valores extremos en que el agua se congela y bulle al mismo tiempo

Destilación rápida multi –etapas (Multi-Stage flash distillation)

En el proceso MSF, el agua de mar es calentada en un deposito llamado calentador de salmuera (*brine heater*). Este proceso se lleva a cabo generalmente condensando vapor en un banco de tubos que atraviesa el deposito en el que se encuentra el agua de mar, esto calienta esta agua de mar que luego pasa a otro deposito, llamado etapa (*stage*), donde la presión ambiente es tal que el agua hierve inmediatamente. La introducción repentina del agua caliente en la cámara causa una ebullición rápida transformándose en vapor. Generalmente, sólo un pequeño porcentaje de esta agua se convierte en vapor, dependiendo de la presión que se mantenga en esta etapa la ebullición continuará hasta que se enfríe y alcance el punto de ebullición.

El vapor generado en el fogonazo es convertido en agua fresca por medio de tubos de intercambio de calor que atraviesan cada etapa. Los tubos son enfriados por el agua entrante en el calentador de salmuera.

Destilación de efectos múltiples (Multiple effect distillation)

La destilación de efectos múltiples (MED) ha sido usada durante mucho tiempo para la destilación industrial. Algunas de las primeras plantas de desalinización usaban este método, pero el proceso fue desplazado por el MSF debido al factor costo y a su aparente alta eficiencia.

El proceso MED, tal como el proceso MSF, se lleva a cabo en depósitos (*effects*) y usa el principio de reducción de la presión ambiental en varios contenedores. Esto le permite al agua de mar lograr evaporaciones múltiples sin necesidad de que le sea añadido calor adicional al suministrado en el primer deposito (*effect*). En el MED, el agua es

precalentada antes de entrar al primer reservorio, donde es calentada hasta la temperatura de ebullición. El agua de mar es distribuida en delgadas capas sobre tuberías de evaporación, para facilitar la ebullición y evaporación. Los tubos son calentados por vapor de un calentador, u otra fuente, el cual se condensa de lado contrario de los tubos. El condensado del generador de vapor es reciclado para ser usado en el calentador.

Destilación por compresión de vapor (Vapor Compressor)

La VC es usado generalmente para plantas de escala media a pequeña. El calor para evaporar el agua proviene de la compresión del vapor en vez de un intercambio directo de calor de un vapor proveniente de una caldera.

Las plantas que usan este proceso son diseñadas generalmente para tomar ventaja del principio de reducción de la temperatura del punto de ebullición por medio de la reducción de la presión. Dos dispositivos pueden ser usados para condensar el vapor y para producir el calor que se suministra al agua entrante: un compresor mecánico o un impulsor de chorro de vapor. El compresor mecánico es usualmente eléctrico, requiriendo únicamente el uso de electricidad para producir agua por destilación.

2.2.1.2.PROCESOS DE MEMBRANA

En la naturaleza las membranas juegan un papel importante en la separación de las sales. Las membranas son usadas en dos procesos importantes de desalinización comercial: electrodiálisis y osmosis inversa (R.O.). La electrodiálisis usa un potencial eléctrico para mover y seleccionar las sales a través de la membrana, dejando tras de si agua fresca. En los procesos RO la presión es usada para lograr la separación, obligando al agua a moverse a través de la membrana dejando las sales tras de si.

Electrodiálisis:

La electrodiálisis depende de los siguientes principios básicos:

- Muchas de las sales disueltas en agua son iónicas, o bien con cargas positivas (cationes) o bien con cargas negativas (Aniones)
- Estos iones son atraídos por electrodos con una carga eléctrica opuesta
- Es posible construir membranas que permiten el paso selectivo o de aniones o de cationes.

Los constituyentes iónicos disueltos en una solución salina se encuentran dispersos en el agua. Cuando un electrodo conectado a una fuente de corriente externa, como por ejemplo una batería, es colocada en un contenedor de agua salada, la corriente eléctrica es transportada a través de la solución, con los iones tendiendo a migrar hacia los electrodos de carga contraria.

Con este fenómeno para desalinizar agua, es necesaria una membrana que permite el paso de aniones o cationes (nunca ambos), que es colocada entre un par de electrodos. Estas membranas tienen un arreglo alterno. Se deja libre un espacio entre ambas membranas que será necesario para que el agua pueda fluir.

Proceso de electrodiálisis inversa (Electrodialysis Reversal Process)

Una unidad EDR opera bajo el mismo principio general que una planta de electrodiálisis estándar, excepto que tanto el canal de agua como el de salmuera son idénticos en construcción. Durante intervalos de tiempo la polaridad de los electrodos es invertida, y el flujo es simultáneamente cambiado por lo que el canal de agua fresca pasa a ser el canal de salmuera y viceversa. Esto se hace con la finalidad de limpiar los conductos con el agua limpia, esta limpieza toma unos 2 minutos antes de que se reestablezca la producción de agua fresca.

Osmosis inversa (Reversal Osmosis)

El RO es un proceso de separación por membrana en la cual el agua de una solución salina presurizada es separada de los solutos (los materiales disueltos) por medio del flujo a través de una membrana. Para esta separación no es necesario calentamiento o cambio de fase. La máxima energía necesaria para la desalinización es la necesaria para presurizar el agua de alimentación.

En la practica, el agua salada de alimentación es bombeada a un deposito cerrado donde es presionada contra la membrana. Como una porción del agua atraviesa esta membrana, el agua de alimentación remanente incrementa su contenido de sal.

2.2.1.3. OTROS PROCESOS

Muchos otros procesos son usados para desalinizar agua. Estos procesos no han alcanzado el nivel de éxito comercial que tienen los procesos de electrodiálisis, destilación u osmosis inversa, pero pueden ser útiles en circunstancias especiales.

Congelación

Durante el proceso de congelación, las sales disueltas son excluidas de manera natural durante la formación de los cristales del hielo. El agua marina puede ser desalinizada congelando el agua bajo condiciones controladas. Antes de que toda la masa de agua se halla congelado, la mezcla generalmente es lavada y enjuagada para remover las sales en el agua remanente o adheridas a los cristales de hielo. El hielo luego es fundido para producir el agua fresca.

Destilación por membrana

Como el nombre lo implica es un proceso mixto de destilación y membrana. En este proceso, el agua salada es calentada hasta que se produce vapor, y este vapor es expuesto a una membrana que deja pasar el vapor pero no el agua. Después de que el vapor atraviesa la membrana, es condensado en una superficie fría para producir agua fresca. En su forma líquida el agua fresca no se puede devolver a través de la membrana, así queda atrapada y es recolectada en la salida de la planta.

La principal ventaja de la destilación por membrana radica en la simplicidad del proceso y en que solo es necesario un pequeño gradiente de temperaturas para poder operar. La destilación por membrana consigue su mejor aplicación donde se dispone de energía térmica barata, como en las industrias o con los colectores solares.

Humidificación solar

Este recurso generalmente imita una parte del ciclo hidrológico del agua en el que el agua salada es calentada por los rayos solares así la producción de vapor de agua (humidificación) aumenta. El vapor de agua es luego condensado sobre una superficie fría, el condensado se recolecta como agua producida.

Una aplicación de este tipo de humidificadores solares es para desalinizar agua en pequeña escala para una familia o un pequeño pueblo donde la energía solar es abundante pero la red eléctrica no se encuentra del todo consolidada.

Existen diferentes modelos desarrollados basados en este principio. El de tipo simple (fig 2.1) es un modelo sencillo que consta de una base (evaporador) y un techo a dos aguas construido de un material semitransparente (vidrio, plexiglass, etc.), donde el agua dulce es condensada y enviada a los canales de recolección, el desalinizador puede ser de una o más etapas, en cada etapa ocurre el proceso de evaporación y condensación de agua

dulce. También existen modelos conocidos como tipo estanque el cual funciona bajo el mismo principio antes establecido, consiste en una caja cerrada en la parte superior por un material semitransparente, el plano de la base es el que posee la inclinación haciendo que el agua condensada se deslice hacia los canales de recolección.

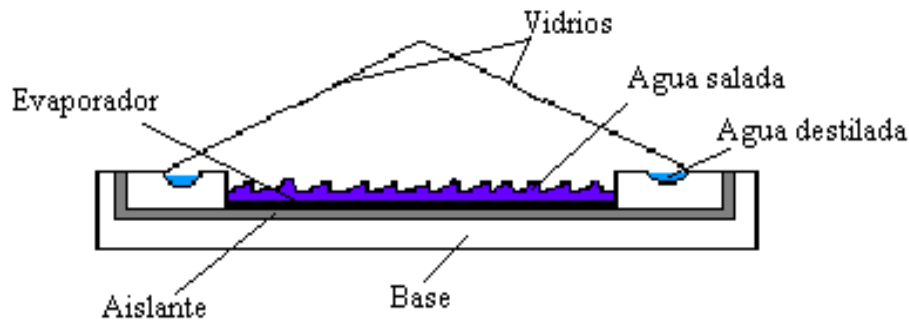


Figura 2.1. Desalinizador tipo simple de una etapa.

Otros desaladores solares o conducidos por viento

Las unidades desalinizadoras que usan colectores solares o recursos de energía eólica para proveer calor o energía eléctrica, son construidas para operar bajo procesos estándares de desalinización. La economía de operar estas plantas suele ser relativo al costo de producir energía con estas tecnologías alternativas. En la actualidad estos costos tienden a ser altos.

2.3. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE LA ENERGÍA SOLAR PARA EL PROCESO.

El proceso de desalinización con energía solar se justifica en localidades donde existe deficiencia o incluso falta de agua dulce, al menos 80 países situados en zonas áridas o semiáridas, donde vive un 40% de la población mundial [7], tienen fuertes períodos de sequía. Algunas de las tasas de crecimiento poblacional mas altas se encuentran en países

áridos, muchos de los cuales tienen en la actualidad graves problemas de escasez de agua. También existen localidades aisladas donde no existe el servicio de agua. Los países Árabes ricos en recursos energéticos (petróleo) representan algunos de los países con menor cantidad de agua per capita, por ejemplo Kuwait ($15 \text{ m}^3/\text{per capita}$), Qatar ($194 \text{ m}^3/\text{per capita}$), Arabia Saudita ($306 \text{ m}^3/\text{per capita}$) y los Emiratos Árabes Unidos ($142 \text{ m}^3/\text{per capita}$) [7]. Estos países han incrementado su provisión de agua por medio de grandes esfuerzos realizados en la desalinización de agua, no obstante en algunos países como por ejemplo las Naciones Africanas, que también sufren escasez de agua y que no poseen altos recursos energéticos, se encuentran en la necesidad de buscar métodos alternativos como es el uso de la energía solar.

Así todas las zonas donde existen deficiencias de suministro de agua y deficiencias energéticas convencionales, pueden encontrar en la desalinización (de agua de mar o salobre) por medio de la energía solar, una solución alternativa y efectiva para satisfacer esta deficiencia. Las condiciones de operación del sistema se verán influenciadas por la situación geográfica donde esté ubicado el mismo.

Para el caso Venezolano, si bien el país posee un gran recurso hídrico, el problema radica en su distribución a centros poblados de pequeño tamaño; es decir los costos de llevar agua a lugares remotos y aislados son elevados. Por otro lado están también las poblaciones que se encuentran ubicadas en islas lejanas a las costas, y que no tienen fuentes de agua dulce propias o suficientes como para satisfacer sus necesidades internas, como por ejemplo Los Roques o Coche. Debido a la ubicación geográfica del país, la cantidad de radiación solar recibida es casi constante a lo largo del año, este factor aunado a los anteriores deben ser considerados al estudiar la verdadera viabilidad de un proyecto para este tipo de plantas.

2.4. TECNOLOGÍAS EXISTENTES.

En la actualidad el método de desalinización mas usado es el de osmosis inversa, a lo largo de los países árabes se ha logrado un alto desarrollo de este tipo de tecnologías, de igual manera se puede encontrar referencias de plantas que funcionan con la energía solar.

En Venezuela se han realizado trabajos de investigación [19,20,27] con el uso de energía solar como fuente de energía en métodos de desalinización, pero las plantas operativas en la actualidad trabajan con el método de osmosis inversa.

Otros proyectos realizados están ubicados en [25]:

- Departamento de Ingeniería mecánica, de la Facultad de ingeniería y tecnología de la universidad de Jordania, Amman. Desarrollado por Ali A. Badran.
- Instituto de refrigeración y criogénica, Universidad Jiao Tong, Shanghai, R. P. China. Desarrollado por Y. J. Dai.
- Instituto de acondicionamiento de aire y energía solar, Universidad Politécnica Nororiental, Xian, R. P. China.
- Abu Dhabi, Emiratos Árabes Unidos con una producción de 120 m³/d.
- Puerto peñasco, Nuevo México, EE.UU. producción de 18,9 m³/d.
- Universidad de Al Kneit, Kuwait, con una producción de 9,8 m³/d.
- El Paso, California, EE.UU. con una producción de 19m³/d.
- Cobber Pedy, Australia, con un área de 3160m².

En Venezuela las plantas instaladas como se había mencionado antes se basan en el principio de osmosis inversas, a continuación nombramos algunas:

- Laboratorios Vargas, Caracas, 1979. Capacidad 38000 GPD.
- Avon cosmetics de Venezuela, Guarenas, 1983, 20500 GPD.

- Flupal C.A., San Juan de Los Morros, Edo. Guarico, 1984, 11500 GPD.
- Industrias Vargas C.A., Tejerías, Edo. Aragua, 1985, 7000 GPD.
- Viasa, Centro de entrenamiento de pilotos, Izcaragua, Edo. Miranda, 1986, 20500 GPD.
- Cementos caribe, Edo. Falcón, 1989, 8 Lts/s.
- Aerotuy, Yate Antares III , 1990, 800 GPD.
- Chapy-Fishing, Gran Roque, 1990, 1500 GPD.
- Línea Turística Aerotuy, Gran Roque, 1991, 1500 GPD.
- C.A. de Turismo “El Pelicano”, Gran Roque, 1992, 3500 GPD.
- Imparques, Gran Roque, 1993, 800 GPD.
- Complejo turístico Puerto Real, Manzanillo, Edo. Nueva Esparta, 1993, 20000 GPD.
- Cadafe, planta centro, Morón, Edo. Carabobo, 1993, 1600000 GPD.
- Oswaldo Cisneros, Edo. Nueva Esparta, 1995, 10000 GPD.
- Consorcio cervecero del centro, Edo. Aragua, 1997, 63408 GPD.

2.5. RADIACIÓN SOLAR.

2.5.1 INTERACCIÓN CON LA ATMOSFERA

Cuando la radiación proveniente del sol alcanza la orbita de la tierra posee una energía aproximada de 1300 W/m^2 , sin embargo no toda esta energía llega a la superficie de la tierra debido a una serie de complejas interacciones con la atmósfera, como se muestra en la figura 2.2

La parte de la radiación que penetra en la atmósfera sin ser dispersada (o absorbida) está en la dirección del ángulo cenital y se denomina radiación directa.

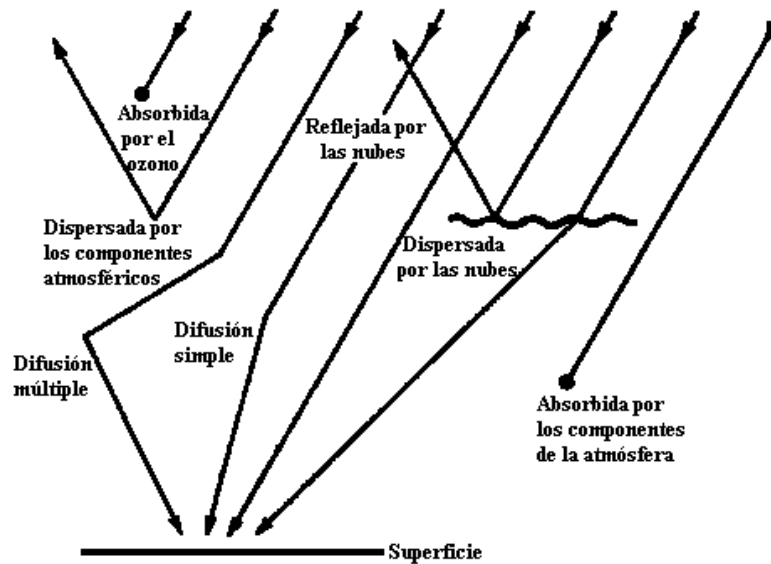


Figura 2.2 Interacción de la radiación solar con la atmósfera

En los niveles mas altos, se desarrolla un proceso en el que se elimina prácticamente la radiación ultravioleta; la molécula normal de oxígeno, O_2 , se disocia primero en oxígeno atómico, O . Algunos de los átomos de oxígeno vuelven a formar moléculas, pero la mayor parte reaccionan con otras moléculas de O_2 , formando moléculas de ozono, O_3 . Entonces se produce un estado de equilibrio en el que la disociación y recombinación de O , O_2 y O_3 se produce continuamente, eliminando casi por completo toda la radiación ultravioleta.

Los fotones con longitudes de onda dentro del espectro visible e infrarrojo, interaccionan con las moléculas gaseosas y partículas de polvo del aire sin poder producir la rotura del enlace; por el contrario, lo que hacen es difundirse en todas direcciones, de manera mas o menos uniforme, de modo que parte de la radiación regresa de nuevo al espacio.

Las pequeñas gotas de agua que se encuentran en el aire también hacen que se disperse fuertemente la radiación y, cuando su concentración es grande, como en las nubes densas, la dispersión múltiple puede hacer que hasta un 80% de los fotones incidentes

vuelvan al espacio. Como la cantidad media de nubes en la tierra ocupa alrededor del 50% de su superficie, éste es un mecanismo importante para la disminución de la energía solar.

Otra barrera importante que se interpone en los rayos incidentes es la absorción real que se produce en las moléculas de vapor de agua, dióxido de carbono y otros elementos.

Estas interacciones con la atmósfera reducen la intensidad de la radiación solar en la superficie de la tierra a poco más de la mitad de su intensidad en la alta atmósfera. La radiación solar total que alcanza la superficie terrestre es la suma de las contribuciones directas y difusa. La contribución difusa puede variar de aproximadamente el 10 % de la radiación total solar en un día claro a cerca del 100 % en un día totalmente nublado. Además, producen variaciones en la distribución espectral de la energía, por absorción y en la dirección en la que la energía llega a la superficie, por difusión. Estos efectos dependen de la composición local de la atmósfera, variando de forma muy significativa de un lugar a otro. La contaminación en las proximidades de las ciudades, el alto contenido de vapor de agua cerca de la costa, y la variabilidad de la cubierta nubosa, son factores que dificultan la predicción de las intensidades energéticas. El factor mas importante es seguramente la longitud del camino que recorre la radiación solar a través de la atmósfera hasta llegar a un lugar concreto. Esto determina, sobretodo, las perdidas por difusión y absorción, que varían de forma muy complicada según la hora del día, estación del año y posición sobre la superficie de la tierra.

2.5.2 POSICIÓN APARENTE DEL SOL

Las características mas importantes del complicado movimiento de la tierra son su traslación alrededor del sol que define un año y su rotación que define el día. Aunque la orbita de la tierra es una elipse, su excentricidad es tan pequeña que se puede suponer un circulo. El radio medio tiene alrededor de 149 millones de kilómetros, las variaciones máximas con respecto a este valor a lo largo del año, sólo representan el 1,5% . Esta variación no es apreciable y no tiene una influencia significativa en las estaciones. Éstas se

deben a la inclinación del eje de rotación el cual no es perpendicular al plano de la órbita. La inclinación con respecto a este plano es de $66,5^\circ$ aproximadamente, y al no haber fuerzas que actúen sobre él, el eje está orientado en una dirección fija en el espacio.

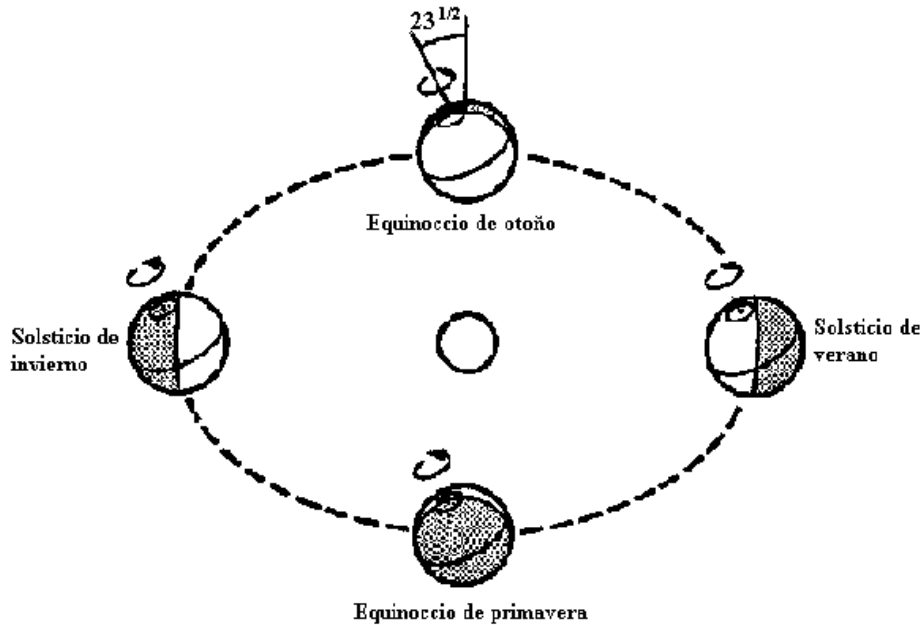


Figura 2.3 Movimiento de la tierra en relación al sol

Como se puede ver en la figura 2.3 esto produce variaciones sustanciales del día respecto a la noche a lo largo del año, al moverse la tierra alrededor de su órbita. En un punto del hemisferio norte se producirá el solsticio de verano (el día mas largo del año), que en la actualidad ocurre el 22 de Junio, cuando el extremo norte del eje se dirige hacia el sol, y el solsticio de invierno (el periodo de noche mas larga), ocurre el 22 de Diciembre, cuando el eje se aparta al máximo del sol. Los dos puntos neutros (en los cuales el día y la noche tienen igual duración) que se producen entre estos dos periodos, cuando el eje de la tierra es perpendicular a la línea que une a la tierra con el sol, se conocen como equinoccios, los cuales ocurren el 21 de Marzo y el 23 de Septiembre. Análogamente en un punto del hemisferio sur el día mas largo ocurrirá el 22 de Diciembre y por lo tanto la noche mas larga ocurrirá el 22 de Junio.

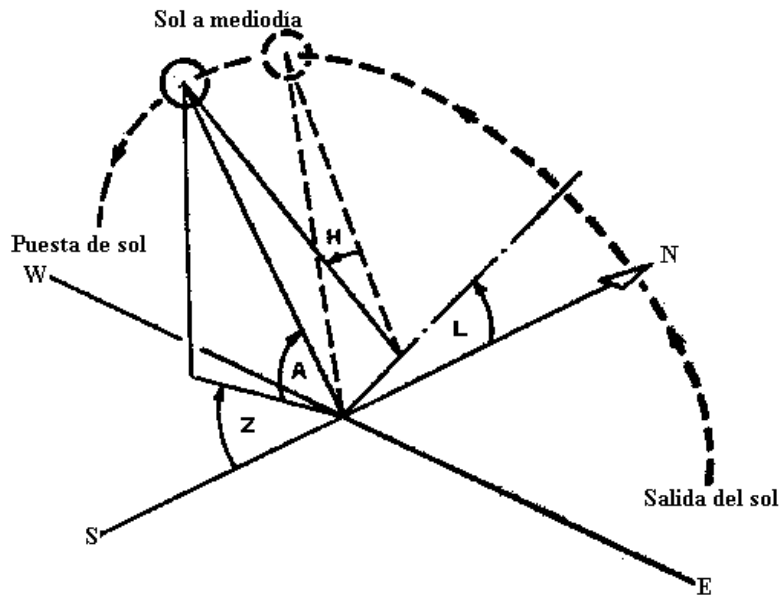


Figura 2.4 Movimiento aparente del sol en la latitud L del hemisferio norte

En la figura 2.4 se muestra el movimiento aparente del sol, visto desde un punto de latitud L del hemisferio norte. La posición aparente del sol en cualquier punto de la tierra la definimos mediante dos ángulos, la Altura A, con respecto al plano horizontal y el Azimut Z en relación con la orientación sur. Cuando el sol está orientado al sur el azimut es 0 y la altura es máxima. En ese instante se dice que es mediodía solar, y es el origen con respecto al que se mide la hora del día.

Los ángulos de altitud y azimut pueden ser calculados por una simple ecuación [14]. El ángulo de altitud medido con respecto al plano horizontal está dado por la siguiente ecuación:

$$A = \arcsen \{ \cos (DEC) \cos (LAT) \cos (HOUR) + \sin (DEC) \sin (LAT) \}$$

donde

DEC: Declinación solar,

LAT: Latitud,

HOUR: Ángulo horario solar.

El ángulo de declinación solar es una medición de la variación del sol respecto a las estaciones. El ángulo de declinación es el mismo que la latitud a en la cual el sol se encuentra en el punto mas alto en un día dado. Esos valores de latitud se encuentra entre los trópicos de cáncer y capricornio y tienen una variación de $\pm 23,5^\circ$ durante el año. Por otro lado, el ángulo de declinación puede verse como, el ángulo entre un punto sobre un observador situado en el ecuador y la posición del sol al mediodía para un día dado. La declinación puede ser calculada con un pequeño porcentaje de error a partir de la ecuación [14]:

$$\text{DEC} = -23,45^\circ \cos \{0,986 (\text{DÍA} + 10.5)\}$$

Donde DÍA es el numero del día contado desde el primero de Enero.

El ángulo horario es definido como el numero de horas entre el mediodía solar y la hora de interés multiplicada por la constante $15^\circ/\text{H}$. El valor de esta constante es determinado por la velocidad a la cual el sol se mueve alrededor de la tierra es decir 360° en 24 horas o 15° por hora. En el calculo de este ángulo es importante usar el tiempo solar y no la hora del día.

El tercer ángulo usado es la latitud, la latitud para cualquier punto del planeta puede extraerse de un atlas.

La duración del día también puede ser calculada con respecto al alba y puesta del sol.

2.6. AGUA Y SU CALIDAD.

La cantidad de agua dulce en el planeta es poca comparada con el agua salada, el 72% de la superficie de la tierra está cubierta por agua, un 97% de esta se encuentra en mares y océanos y el 3% es dulce. Del porcentaje de agua dulce un 79% se halla congelada en los casquetes polares y glaciares y 21% es líquida [28]. La antártica es una zona de tierra

cubierta por una gigantesca y gruesa capa de hielo que pesa billones de toneladas, esa capa contiene mas agua dulce que todos los ríos y lagos del mundo juntos.

Una gran parte de agua dulce conforma los ríos lagos y cauces subterráneos:

El 20% es agua subterránea,

El 1% es agua superficial,

Y de este volumen de agua superficial, a su vez:

El 52% esta en lagos,

El 38% en el suelo,

El 8% en estado de evaporación,

El 1% en los ríos,

El 1% en los seres vivos.

En las figuras 2.5 y 2.6 se muestra la distribución antes expuesta.

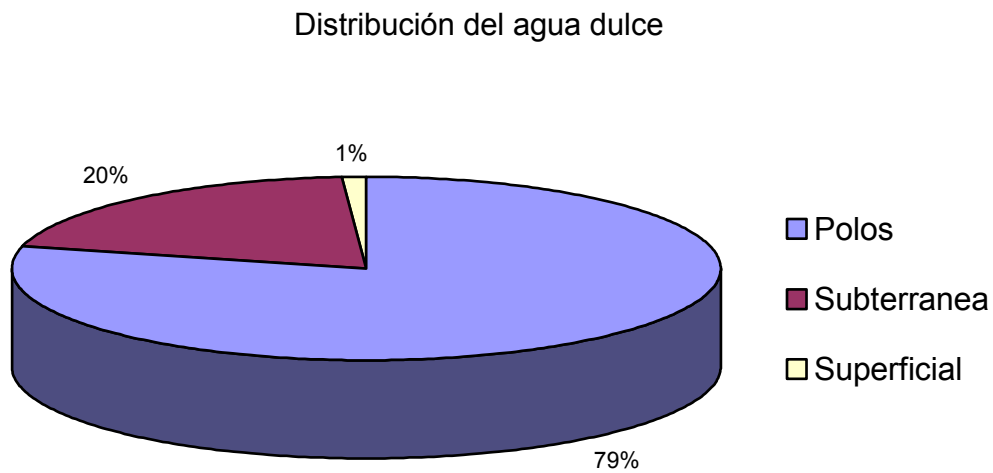


Figura 2.5

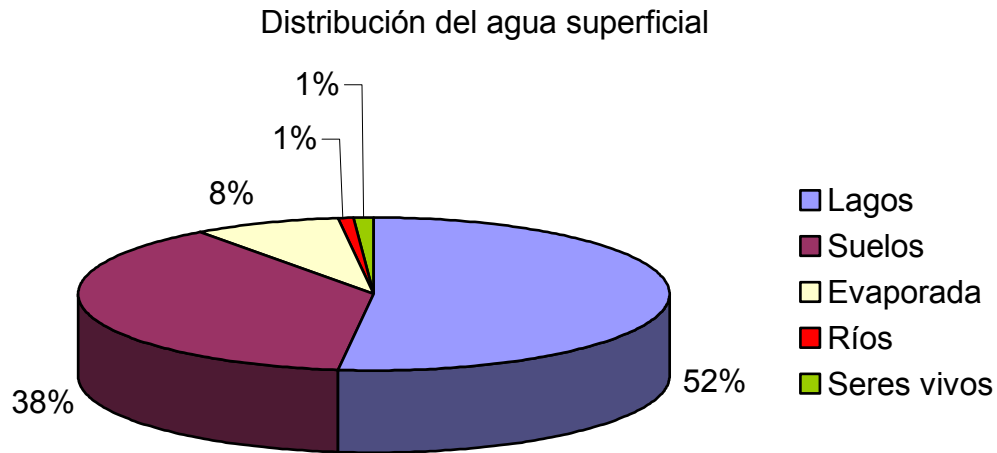


Figura 2.6

El ser humano aprovecha esta porción para su consumo cuando utiliza los costosos procesos de potabilización. De las fuentes de agua del mundo una gran cantidad está severamente contaminada por las actividades y desechos de las sociedades humanas.

Como podemos apreciar la cantidad de agua dulce es ínfima en comparación con el agua salada, tenemos un gran recurso hídrico que aun los costos de los procesos de desalinización hacen difícil de explotar.

2.6.1. CRITERIOS SOBRE LA CALIDAD DEL AGUA

Consideraciones preliminares

Antes de establecer normas sobre la calidad del agua de consumo, debe definirse las metas y los costos.

Básicamente el agua que se suministra debe cumplir con dos condiciones:

- A. No debe ser peligrosa para la salud o la vida de los consumidores.
- B. El sistema debe poder operar a un costo razonable.

Estas condiciones pueden ser en ocasiones conflictivas, pero la norma que se establezca debe ser tal, que tenga en consideración ambos factores.

Para cumplir con lo primero, el agua no debe contener ni microorganismos patógenos, ni sustancias tóxicas o nocivas para la salud. Esta es una condición imprescindible.

Para cumplir con lo segundo, las características del agua deben ser tales, que no produzcan daño, ni a la red de distribución, ni a las industrias, ni a la economía privada, y que pueda llegar a estos sin tener que hacer al agua un tratamiento excepcionalmente costoso.

En este punto, cada país debe llegar a establecer sus propias normas, de acuerdo con la calidad de agua cruda que suele obtener y la relación costo beneficio que puede producir en la región, la presencia de determinados iones (como hierro, sulfato, carbonato) en el agua que se distribuye.

Normas sobre la potabilidad del agua

El agua debe cumplir con ciertas normas bacteriológicas y fisicoquímicas para que pueda ser considerada potable.

- Normas bacteriológicas

Desde el punto de vista bacteriológico, se ha establecido que no debe mostrar la presencia de *Escherichia coli* (E Coli). Esta regla no tiene en cuenta los virus entéricos ni los protozoarios que pueden existir en el agua y que son potencialmente peligrosos. La

dificultad que entraña el aislarlos y detectarlos hace que hasta ahora, en el control rutinario de las plantas de tratamientos, no se hagan pruebas para constatar su presencia.

Las normas internacionales para agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 1974 establece una diferencia entre la calidad del agua que se suministra por medio de una red de distribución a la comunidad y la que no se suministra en esta forma, partiendo del principio de que a esta última le resulta impracticable mantener los mismos patrones de calidad que a la primera.

En abastecimientos individuales o para pequeñas comunidades, el recuento de coliformes debe ser menor de 10 por 100 ml. El no poder lograr esto, y particularmente la presencia repetida de E coli, debe conducir a abandonar el abastecimiento como regla general.

Las normas de la Agencia para la Protección del Ambiente (EPA) de los EEUU de 1986 no distinguen entre agua en la planta y agua en la red. Según ellas, toda agua para el consumo tiene que tener menos de 1 coli por 100 ml.

Las normas de la Comunidad Económica Europea (CEE) no permite coliformes fecales en el agua de consumo

- Normas fisico-químicas

Las sustancias que un agua no debe contener se pueden clasificar en dos grupos:

- A. Sustancias tóxicas
- B. Sustancias que pueden producir determinadas enfermedades

En la tabla 1 del apéndice se incluyen los nombres de estas sustancias y los valores máximos recomendables y permisibles establecidos en las normas de la OMS de 1974, en las normas de la EPA de los Estados Unidos y en la CEE

2.7. MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

2.7.1 RADIACIÓN

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, esta puede provenir de superficies sólidas, líquidas o gaseosas. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. De hecho la transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío.

Considerando los procesos de transferencia de radiación para la superficie de la figura 2.7 observamos que la radiación que la superficie emite se origina a partir de la energía térmica de la materia limitada por la superficie, y la velocidad a la que libera energía por unidad de área (W/m^2) se denomina la potencia emisiva superficial E . Hay un límite superior para la potencia emisiva, que es establecida por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

donde T_s es la temperatura absoluta (K) de la superficie y σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$) dicha superficie se llama radiador ideal o cuerpo negro.

El flujo de calor emitido por una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dado por

$$E = \varepsilon\sigma T_s^4 \quad (2.1)$$

donde ε es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad, con valores dentro del rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación con un cuerpo negro.

La radiación también puede incidir sobre una superficie desde sus alrededores. La radiación se origina desde una fuente especial, como el sol, o de otras superficies a las que se expone la superficie de interés. Sin tener en cuenta la fuente designamos la velocidad a la que toda esa radiación incide sobre un área unitaria de la superficie como la irradiación G (ver figura 2.8).

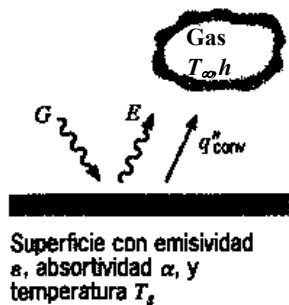


Figura 2.7

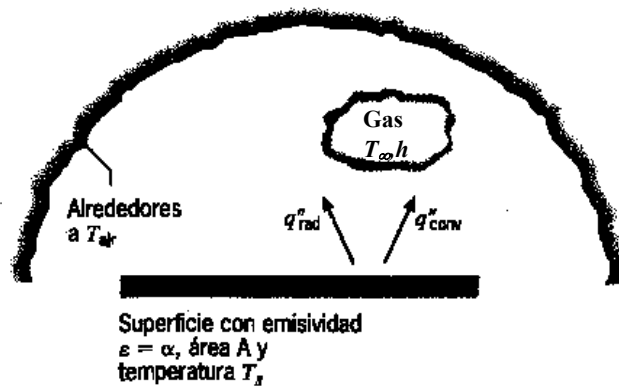


Figura 2.8

Una parte de la irradiación, o toda, tal vez sea absorbida por la superficie, y así se incrementaría la energía térmica del material. La velocidad a la que la energía radiante es absorbida por área superficial unitaria se evalúa a partir de una propiedad radiativa de la superficie denominada absorptividad α ,

$$G_{abs} = \alpha G \quad (2.2)$$

donde $0 \leq \alpha \leq 1$. Si $\alpha < 1$ y la superficie es opaca, parte de la irradiación se refleja. Si la superficie es semitransparente, parte de la irradiación también se transmite. Sin embargo, mientras la radiación absorbida y emitida aumenta y disminuye, respectivamente, la energía térmica de la materia, la radiación reflejada y transmitida no tiene ningún efecto sobre esta energía. El valor de α depende de la naturaleza de la irradiación así como de la superficie misma.

2.7.1.1 ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN.

La irradiación espectral G_λ ($\text{W}/\text{m}^2\mu\text{m}$) se define como la rapidez a la que la radiación de longitud de onda λ incide sobre una superficie por unidad de área de la superficie y por intervalo de longitud de onda unitario $d\lambda$ alrededor de λ . Puede incidir de todas las direcciones posibles, y se puede originar desde varias fuentes diferentes. La irradiación total G (W/m^2) abarca todas las contribuciones espectrales. En la situación mas común, la irradiación interactúa con un medio semitransparente, tal como una capa de agua o una placa de vidrio. Como se muestra en la figura 2.9 para un componente espectral de la irradiación parte de esta irradiación se puede reflejar, absorber y transmitir. A partir de un balance de radiación sobre el medio, se tiene que

$$G_\lambda = G_{\lambda,ref} + G_{\lambda,abs} + G_{\lambda,tr} \quad (2.3)$$

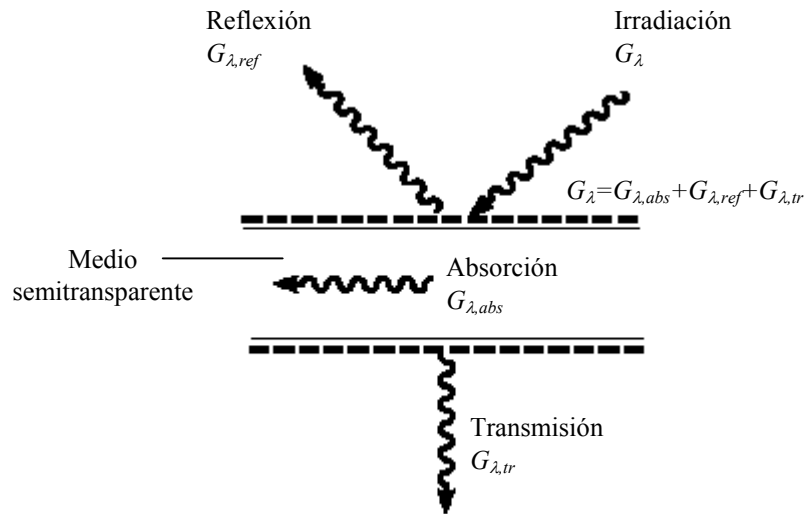


Figura 2.9 Procesos de absorción, reflexión y transmisión en un medio semitransparente

La determinación de estos componentes depende de las condiciones de las superficies superior e inferior, la longitud de onda de la radiación, y la composición y espesor del medio. Además, las condiciones pueden estar fuertemente influenciadas por efectos volumétricos que ocurren dentro del medio.

Absortividad

La absortividad es una propiedad que determina la fracción de la irradiación absorbida por una superficie. La absortividad direccional espectral, $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$, de una superficie se define como la fracción de la intensidad espectral incidente en la dirección de θ y ϕ que la superficie absorbe. Para el cálculo de este término, se ignora cualquier dependencia de la absortividad sobre la temperatura de la superficie. Tal dependencia es pequeña para la mayoría de las propiedades radiativas espectrales.

Las superficies pueden exhibir una absorción selectiva con respecto a la longitud de onda y a la dirección de la radiación incidente.

La absorptividad hemisférica espectral $\alpha_\lambda(\lambda)$, depende de la distribución direccional de la radiación incidente, así como también de la longitud de onda de la radiación y de la naturaleza de la superficie absorbente.

La absorptividad hemisférica total, α , representa un promedio integrado sobre la dirección y la longitud de onda. Se define como la fracción de la irradiación total absorbida por una superficie

$$\alpha \equiv \frac{G_{abs}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda(\lambda) G_\lambda(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_\lambda(\lambda) d\lambda} \quad (2.4)$$

En consecuencia, α depende de la distribución espectral de la radiación incidente, así como de su distribución direccional y de la naturaleza de la superficie de absorción.

Puesto que α depende de la distribución espectral de la irradiación, su valor para una superficie expuesta a la radiación solar puede diferir apreciablemente de su valor para la misma superficie expuesta a radiación de longitud de onda más grande originada desde una fuente de temperatura más baja. Como la distribución espectral de radiación solar es casi proporcional a la de la emisión de un cuerpo negro a 5800 K, se tiene que la absorptividad total para la radiación solar α_s se puede aproximar como

$$\alpha \approx \frac{\int_0^{\infty} \alpha_\lambda(\lambda) E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,b}(\lambda, 5800K) d\lambda} \quad (2.5)$$

Reflectividad

La reflectividad es una propiedad que determina la fracción de la radiación incidente reflejada por una superficie. Sin embargo, su definición específica puede tomar varias formas diferentes, pues la propiedad es inherentemente bidireccional. Es decir, además de depender de la dirección de la radiación incidente también depende de la dirección que presenta la radiación reflejada.

La reflectividad direccional espectral, $\rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\phi)$, de una superficie se define como la fracción de intensidad espectral incidente en la dirección de θ y ϕ , que es reflejada por la superficie. La reflectividad hemisférica espectral $\rho_{\lambda}(\lambda)$ se define como la fracción de la irradiación espectral que es reflejada por la superficie.

La reflectividad hemisférica total ρ se define entonces como

$$\rho \equiv \frac{G_{REF}}{G} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda}(\lambda) G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (2.6)$$

Las superficies se pueden idealizar como difusas o especulares de acuerdo con la forma en que reflejan la radiación (ver figura 2.10) La reflexión difusa ocurre si, sin importar la dirección de la radiación incidente, la intensidad de la radiación reflejada es independiente del ángulo de reflexión. Por el contrario, si toda la reflexión es en la dirección de θ_2 , que es igual al ángulo incidente θ_1 , se dice que ocurre la reflexión especular. Aunque ninguna superficie es perfectamente difusa o especular, la última condición se aproxima más de cerca con superficies de espejo pulidas y la primera condición mediante superficies ásperas

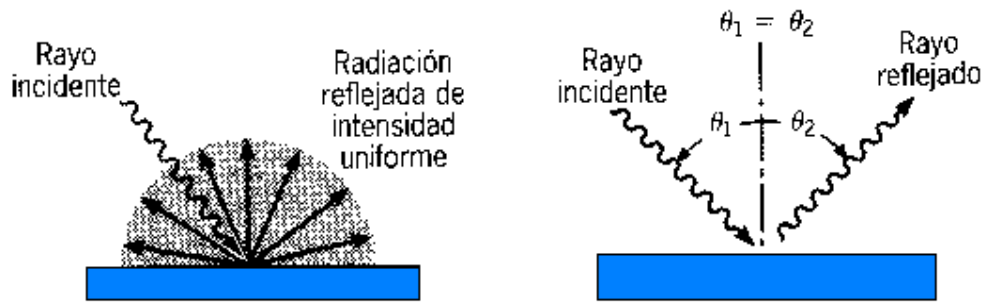


Figura 2.10 Reflexión difusa y especular

Transmisividad

Aunque el tratamiento de la respuesta de un material semitransparente a la radiación incidente es un problema complicado, a menudo se pueden obtener resultados razonables mediante el uso de transmisividades hemisféricas definidas como:

$$\tau_{\lambda} = \frac{G_{\lambda, tr}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{G_{tr}}{G} \quad (2.8)$$

La transmisividad total τ está relacionada con la componente espectral τ_{λ} mediante

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} G_{\lambda, tr}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_0^{\infty} \tau_{\lambda} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} G_{\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad (2.9)$$

2.7.1.2 CONSIDERACIONES ESPECIALES

Del balance de la ecuación 2.3 y de las definiciones anteriores se tiene que

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (2.10)$$

para un medio semitransparente. Con respecto a propiedades que se promedian sobre todo el espectro, de manera análoga

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.11)$$

Por supuesto si el medio es opaco no hay transmisión, y la absorción y reflexión son procesos superficiales para los que

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} = 1 \quad (2.12)$$

y

$$\alpha + \rho = 1 \quad (2.13)$$

Por tanto, el conocimiento de una propiedad implica el conocimiento de la otra.

2.7.2 FENOMENO DE EVAPORACIÓN EN EL DESTILADOR SOLAR.

La evaporación ocurre por el escape de moléculas en movimiento en la superficie del agua hacia los gases (el medio) sobre esta. El calor sensible (del tipo que puede ser medido con un termómetro) es causado por el movimiento de las moléculas, tomando en cuenta que no se mueven todas a la misma velocidad. Si se añade energía al sistema estas moléculas empiezan a moverse mas rápido, así las que se mueven mas rápido escapan de la superficie para convertirse en vapor.

Es necesaria una gran cantidad de energía para vaporizar el agua. Mientras cierta cantidad de energía es necesaria para aumentar la temperatura de 1 Kg de agua de 0° a 100°C , es necesaria cinco veces y media mas energía para transformar el agua a 100° C a vapor a 100° C . Sin embargo prácticamente toda esta energía es devuelta cuando el vapor de agua se condensa.

Las sales y minerales no se evaporan junto al vapor. La sal por ejemplo se evapora al alcanzar los 1400° C, permaneciendo en la salmuera cuando el agua se evapora; funcionando de la misma manera que el ciclo hidrológico del agua, formando las nubes.

No es necesario hacer bullir el agua para lograr el proceso de destilado, transformándola en vapor, por el proceso antes descrito, se logra el mismo efecto, usualmente en el destilador se obtiene agua aun mas pura debido a que durante la ebullición el estallido de las burbujas que se forman puede contaminar el agua que se está evaporando.

Enfriamiento evaporativo:

El proceso que se lleva a cabo entre la superficie del agua y el aire sobre esta es un proceso de transferencia de calor y masa conocido como enfriamiento evaporativo, la evaporación debe ocurrir en la superficie del líquido y la energía asociada con el cambio de fase es el calor latente de vaporización del líquido (h_{fg}). Para que pueda haber evaporación es necesario vencer la energía de unión de las moléculas de la superficie, esta energía es lograda cuando las moléculas cerca de la superficie colisionan entre si. La energía que se requiere para mantener la evaporación debe venir de la energía interna del líquido, que entonces experimenta una reducción de temperatura (efecto de enfriamiento). Si se mantienen condiciones de estado estable, la energía latente perdida por el líquido debido a la evaporación debe recuperarse mediante la transferencia de energía al líquido desde sus alrededores.

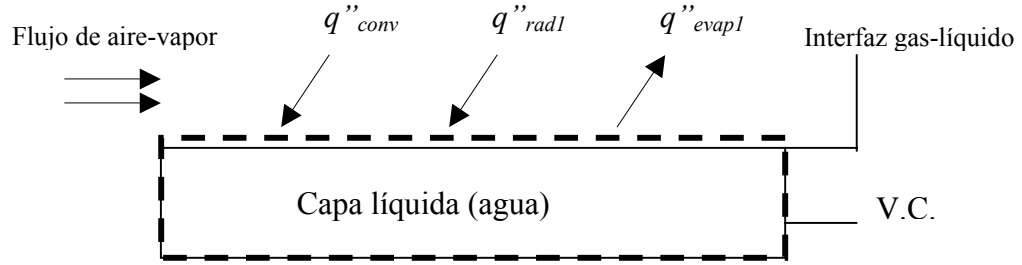


Figura 2.11

Al aplicar la conservación de la energía a una superficie de control alrededor del líquido se sigue que, para un área superficial unitaria (ver figura 2.11):

$$q''_{conv} + q''_{rad} = q''_{evap} \quad (2.14)$$

q''_{evap} se aproxima como el producto del flujo de masa evaporativa y el calor latente de vaporización

$$q''_{evap} = n''_A h_{fg} \quad (2.15)$$

y

$$n''_A = h_m (\rho_{A,s} - \rho_{A,\infty}) \quad (2.16)$$

donde h_m es el coeficiente de transferencia de masa por convección y $\rho_{A,s}$ se asocia con las condiciones saturadas a T_s notando que existe un equilibrio termodinámico en la interfaz entre el gas y el líquido. Una consecuencia de esta condición de equilibrio es que la temperatura del vapor en la interfaz es igual a la temperatura superficial T_s . Una segunda implicación es que el vapor se encuentra en un estado saturado, en cuyo caso las tablas termodinámicas sirven para obtener $\rho_{A,s}$ a partir del conocimiento de T_s .

2.7.3 FENOMENO DE CONDENSACIÓN EN EL DESTILADOR SOLAR

Para entender el proceso termodinámico de condensación que se lleva a cabo tomamos el modelo simplificado de una mezcla de aire-vapor. Esto nos lleva a considerar ciertas suposiciones:

1. La fase líquida no contiene gases disueltos.
2. La fase gaseosa puede ser tratada como una mezcla de gases ideales.
3. Cuando la mezcla y la fase condensada se encuentran a una presión y temperatura dadas, el equilibrio entre la fase condensada y su vapor no se encuentra influenciado por la presencia de otros componentes, esto significa que cuando el equilibrio es alcanzado, la presión parcial del vapor será igual a la presión de saturación correspondiente a la temperatura de la mezcla.

El punto de rocío de una mezcla vapor-aire es la temperatura a la cual el vapor se condensa cuando es enfriado a presión constante como se muestra en la figura 2.12. Suponiendo que la temperatura de la mezcla y la presión parcial del vapor son tales que el vapor se encuentra inicialmente sobrecalentado en el estado 1. Si la mezcla es enfriada a presión constante, la presión parcial del vapor permanece constante hasta que el punto 2 es alcanzado y comienza la condensación. La temperatura en el punto 2 es la temperatura del punto de rocío.

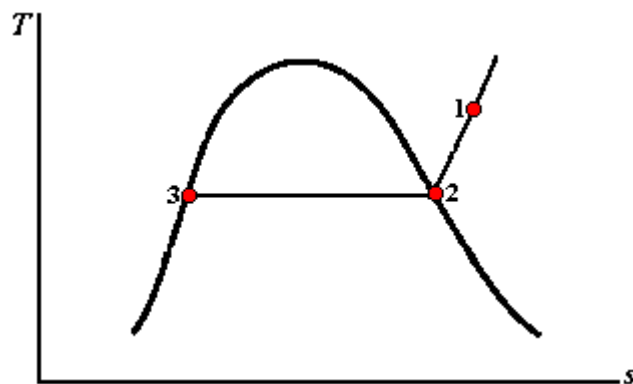


Figura 2.12 Diagrama T-s

El fenómeno de condensación que ocurre en la parte inferior de los vidrios puede aproximarse a la condensación en película sobre una placa vertical (desarrollada por Nusselt) con una corrección de las ecuaciones para cuando la placa está inclinada [11]. Para formular las ecuaciones que rigen el proceso se deben tomar en cuenta algunas suposiciones:

1. Se desprecia el impedimento para la transferencia de calor que ocasiona el hecho de que el vapor de agua está mezclado con gases no condensables a las condiciones a las que ocurre el proceso (aire seco), ya que el vapor debe difundirse en el gas antes de que pueda condensarse sobre la superficie.
2. El vapor está sobrecalentado.
3. El esfuerzo viscoso del vapor sobre la película es despreciable en la interfaz de estos.
4. El gradiente de temperaturas entre las condiciones de pared y del vapor (película de líquido) no es lineal.
5. La película de líquido se enfría por debajo de la temperatura de saturación

El calor cedido por la condensación puede escribirse como [11]:

$$q''_{conden} = \bar{h}_f (T_s - T_p) = \dot{m} h_{fg} \quad (2.17)$$

donde T_s es la temperatura del vapor en el borde de la película, interfaz donde el líquido y el vapor se encuentran en equilibrio (estado de saturación), es la temperatura de saturación T_g ; T_p es la temperatura de la placa (vidrio); \dot{m} es el flujo másico a través de la sección de la película de condensado y h_{fg} es el calor latente de condensación del vapor de agua.

El coeficiente promedio de transferencia de calor por convección desarrollado por Nusselt viene dado por la ecuación [11]:

$$\bar{h}_f = 0.943 \left[\frac{\rho(\rho - \rho_v)g'h'_{fg}k^3_f}{L\mu_f(T_s - T_p)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2.18)$$

donde las propiedades se evalúan a la temperatura de película T_f

$$T_f = \frac{T_g + T_p}{2} \quad (2.19)$$

el calor latente h'_{fg} (Desarrollada por Rohsenow) que toma en cuenta las suposiciones antes mencionadas 4 y 5 es:

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.68Cp(T_s + T_p) \quad (2.20)$$

y la gravedad g' es [11]

$$g' = g \sin \vartheta \quad (2.21)$$

siendo g la gravedad y ϑ el ángulo de inclinación de la placa con respecto a la horizontal.

La ecuación 2.18 es válida para $Pr > 0.5$, $Cp \cdot T_f / h_{fg} \leq 1.0$ y $40 < Re_f < 1800$ [11].

CAPÍTULO III

DISEÑO

3.1. CONSIDERACIONES.

Dimensiones:

La relación entre el tamaño y la capacidad de producción de una desalinizadora solar depende tanto de su diseño como de su eficiencia. La relación área / capacidad debe estar aproximadamente en el orden de 10 a 1 si la unidad es cubierta por vidrio y bien aislada [5]. Por ejemplo, una unidad de 30 galones por día requerirá de unos 300 pies cuadrados de área en condiciones optimas.

Selección del emplazamiento:

Para la selección del emplazamiento debe tomarse en cuenta el hecho de que la planta necesita que la luz solar incida directamente sobre ella desde la aparición hasta la puesta del sol. De igual manera la localización cercana a la fuente de agua que se piensa desalar sería una condición optima. En base a esta premisa podríamos concluir que el sitio mas idóneo es la costa (una playa), pero esto trae un inconveniente al momento de hacer las mediciones, y con la preservación de los equipos necesarios para hacer estas mediciones.

Consideramos como la orientación mas idónea aquella en la cual la cara del vidrio está en vista al sur, ya que de esta forma la sombra proyectada dentro de la planta será menor e incluso se espera que la tapa posterior no proyecte sombra dentro del modelo.

Las consideraciones a tomar en cuenta previas al diseño deberán ser las siguientes:

- El método de llenado debe ser tal que el caudal de agua entrante pueda ser regulado sin muchos inconvenientes

- Solo operará durante las horas de sol
- Debe ser limpiado de manera periódica
- Debe ser económico

Las ventajas que posee un sistema de este tipo son:

- No ocasiona costos de combustible
- Se espera que la destilación produzca mas de 5 litros de agua diaria
- Es de muy fácil construcción y operación
- El modelo debido a sus dimensiones puede ser transportado sin representar mayores inconvenientes, lo cual lo hace ideal para aplicaciones de campo
- Puede destilar no solo agua de mar sino también puede servir para aguas salobres.

3.2. SÍNTESIS DEL MODELO.

La radiación solar pasa a través de la cubierta de vidrio calentando la salmuera o agua de mar provocando luego la evaporación de esta. Este vapor se eleva y se condensa sobre la cara interna de la cubierta de vidrio, se desliza sobre las mismas hasta ser recogida en los canales de destilado.

Una descripción mas completa es la siguiente:

- La energía del sol en forma de ondas cortas electromagnéticas pasa a través de la superficie semitransparente de vidrio. Una vez que estas ondas golpean contra la superficie negra del fondo, estas sufren una alteración y varían, incrementándose la longitud de la onda. Estas ondas son absorbidas por el agua depositada en la bandeja, a medida que la temperatura del agua comienza a incrementarse, producto de esta absorción de energía, el agua empieza a evaporarse.

- El vapor se eleva hacia una zona mas fría. Casi todas las impurezas son dejadas atrás en la bandeja, ya que estas no se evaporan con el agua.
- El vapor se condensa en la superficie interna de la cubierta inferior cediendo calor a esta, la cual se encuentra a una temperatura inferior que el agua de la bandeja. Esta agua condensada forma capas que se deslizan a lo largo de la superficie del vidrio.
- La combinación de los efectos de gravedad e inclinación de la cubierta permite que el agua se deslice hacia los canales de recolección. Luego el agua recogida es transportada hasta un deposito de almacenamiento.
- El vapor condensado en la cubierta inferior transmite calor, a través del vidrio, al agua que se desliza sobre la superficie externa de esta, esta agua se evapora y se condensa en la superficie interna de la cubierta superior.

En la mayoría de las unidades menos de la mitad de la radiación incidente sobre el destilador es usada para obtener el calor de vaporización necesario para producir el agua destilada. En los destiladores comerciales la eficiencia varia en un rango de 30 a 45 % (la máxima eficiencia es 60 %) [10].

Los componentes principales de el destilador son los siguientes:

- Bandeja (evaporador);
- Estructura de soporte;
- Cubierta semitransparente;
- Canales de recolección de agua destilada.

Los componentes secundarios del destilador son:

- Aislante (usualmente colocado debajo de la bandeja);
- Sellador;
- Tuberías y válvulas;
- Deposito de agua destilada;

Para el diseño que se plantea, se considera colocar dos etapas en el destilador, dado que se obtiene una mayor superficie para la evaporación, y de igual manera se obtiene mayor superficie para la condensación, lo que incrementa la cantidad de agua destilada. El calor cedido al vidrio por el vapor que se condensa en la primera etapa es aprovechado para evaporar el agua en la segunda etapa. En la figura 3.1 se presenta un esquema para visualizar este tipo de destilador:

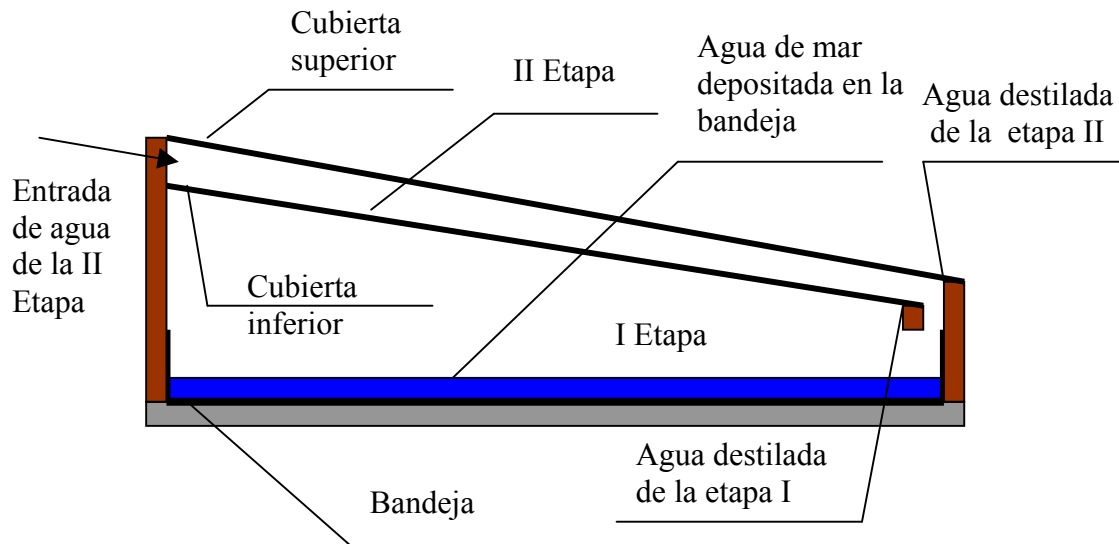


Figura 3.1 Esquema del destilador de dos etapas

La estructura utilizada en este tipo de destilador de dos etapas representa una desventaja, ya que el número de partes que la conforman es mayor, disminuyendo la entrada de radiación directa y proyectando mas sombra en el destilador, adicionalmente esto representa un incremento en el costo del destilador.

No se conoce a priori cual de las dos condiciones antes expuestas será preponderante en el sistema, lo que se determinará luego de haber realizado las pruebas al modelo y se analicen los resultados con las características de un destilador semejante de 1 etapa.

Un factor importante es la inclinación que posee la cubierta semitransparente, esta inclinación puede tomar valores entre 10° y 45° [19]. Para los valores muy pequeños se corre el riesgo de que el agua no deslice en la forma deseada sino que gotee dentro del destilador, lo cual disminuye el rendimiento. Para valores muy altos la radiación incidente será reflejada en buena parte y adicional a esto la sombra proyectada aumenta.

Si la radiación solar incide en 90° exactos sobre una cubierta de vidrio alrededor del 90% de la luz incidente penetrara en el destilador, en cambio si el ángulo es de 20° la cantidad de luz reflejada es máxima. Esta condición hace difícil la elección del ángulo de inclinación, ya que se tiene que pensar en un ángulo que permita la incidencia perpendicular la mayor parte del tiempo.

Existen tres razones por lo que es recomendado usar el menor ángulo posible de inclinación de la cubierta: (1) Mientras mas grande sea el ángulo de inclinación se necesitará mayor cantidad de materiales para el soporte y mayor cantidad de vidrio para cubrir un área dada. (2) Un ángulo grande incrementa el volumen y peso (del destilador) así como los costos. (3) Colocar la cubierta con un gran ángulo incrementará el volumen de aire dentro del destilador lo que disminuye la eficiencia del sistema. Una cubierta de vidrio que se encuentra separada aproximadamente a unos 5 – 7 cm de la superficie del agua permitirá al destilador trabajar eficientemente [10].

3.3. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES

Siempre será preferible que se usen materiales que puedan ser hallados con facilidad en la zona donde se instalara la planta, de manera que cuando sea necesario reponer una

pieza se pueda hacer a la brevedad posible, de igual manera se deben minimizar los costos iniciales.

Los materiales usados en este tipo de destiladores deben poseer características tales como:

- Deben tener una gran durabilidad bajo condiciones de intemperie o en su defecto ser lo suficientemente económicos como para ser reemplazados en la medida en que estos se degraden
- Deberán ser lo suficientemente fuertes para resistir el daño producido por el viento y pequeños movimientos de tierra
- Deberán ser atóxicos y no emitir vapores que puedan transmitir sabores desagradables al agua
- Deberán ser capaces de soportar la corrosión del agua de mar y de la salmuera
- Deberán tener un peso y volumen que permita su fácil empaque y transporte
- Deberán ser de fácil manejo

La selección de los materiales para aquellas piezas que entrarán en contacto con el agua y el vapor representa un problema. Muchos plásticos pueden transmitir al agua sustancias que pueden ser percibidas por el olfato o por el gusto en el agua producida, en periodos que van desde unos cuantos días hasta años en algunos casos. Se puede realizar una prueba sencilla de los materiales a usar poniendo estos en una olla con agua limpia y esperar a que hierva, esto puede representar un proceso acelerado de lo que puede llegar a ocurrir el destilador, una vez se halla enfriado se puede oler y probar el agua para ver si

existe una diferencia notable en ella. Si no se puede notar ninguna diferencia entre el agua de la prueba y el agua inicial el material probablemente sea seguro.

El destilador consta básicamente de los siguientes componentes: (1) Estructuras de soporte, (2) Cubierta, (3) Bandeja, (4) Aislante y sellos, (5) Sistema de tuberías y (6) Depósito de almacenamiento. Seguidamente describiremos estos componentes, algunos de los materiales probados con este fin y sus ventajas y desventajas.

3.3.1. ESTRUCTURAS DE SOPORTE

Las primeras opciones que se toman en cuenta son madera, metal, concreto o algunos tipos de plásticos. En la mayoría de los casos la prelación es causada por la disponibilidad de los materiales, en otros, como en nuestro caso, la selección se basa en la facilidad de trabajar el material y lo económico del mismo. Se debe tomar en cuenta que idealmente el esqueleto que soporta la cubierta debe ser construido con piezas de pequeño tamaño para evitar una sombra excesiva sobre la bandeja.

Las estructuras de soporte de madera están sujetas a pandeo, agrietamiento o incluso putrefacción del material. Si se elige una madera de alta calidad y durabilidad como ciprés o nogal se pueden aliviar estos problemas, pero si dentro y fuera del destilador prevalece un ambiente de altas temperaturas y humedad, el destilador requerirá reparaciones o reemplazos frecuentes. Las principales ventajas que ofrece el usar madera es la facilidad de trabajarla con herramientas básicas, su relativo bajo costo, la disponibilidad de este recurso y el bajo impacto que ocasiona al ambiente como desecho, comparada con plásticos, uretanos, etc.).

Las estructuras de metal si bien no se pudren o pandean están sujetas a la corrosión . Gracias a que la estructura de metal no se pandea, esto ayudará a garantizar la integridad de los sellos, pero se debe tomar en cuenta que el coeficiente de expansión del metal que se este usando sea compatible con el material de la cubierta y de los sellos. El uso de metal

para el esqueleto está casi limitado a aluminio y acero galvanizado. Los dos duraran casi indefinidamente si tienen una buena protección contra la exposición externa. La silicona no tiene una buena adherencia al acero galvanizado, pero se adhiere muy bien en el aluminio.

Para el modelo propuesto se utilizaron diferentes tipos de madera en la estructura general (base, tapas, perfiles base laterales y perfiles de soporte de vidrios), dependiendo de la función de las partes, la disponibilidad en el mercado, la posibilidad de trabajo artesanal (carpintería) sobre estas y lo económico del material. Cualquier otra opción como acrílico, algún metal o resina, incrementaría los costos de los perfiles, en caso de poder hacerse.

Las piezas realizadas de madera son selladas y luego recubiertas con poliuretano para evitar que las mismas absorban el agua o vapor de agua en el sistema y así evitar su deterioro y deformación.

3.3.2. CUBIERTA

Después de la bandeja, la cubierta es la pieza mas critica de un destilador solar. Va montada sobre la bandeja y debe ser capaz de transmitir la mayor cantidad posible de radiación del espectro visible y evitar que el calor generado por esa radiación escape al exterior. La exposición a la luz ultravioleta requiere de un material que pueda soportar la degradación que esta genera o debe ser lo suficiente mente económico como para ser remplazado periódicamente. Debido a que internamente se pueden llegar generar temperaturas que alcancen los 95° C (200° F) [10], debe ser también capaz de soportar su propio peso a estas temperaturas y no tener una expansión excesiva, lo cual destruiría los sellos.

El material de la cubierta debe ser lo suficientemente fuerte para resistir los vientos, la lluvia, movimientos y prevenir la intrusión de insectos. Una condición favorable es que la cubierta permita que el vapor condensado forme una capa de agua en el lado interno en vez de la formación de gotas. Estas capas deslizan hacia los canales de recolección,

mientras que la formación de gotas reduce el desempeño del destilador por las siguientes razones:

- Las gotas de agua restringen la cantidad de luz que entra al destilador porque actúan como pequeños espejos y reflejan la luz nuevamente hacia fuera.
- Un porcentaje del agua destilada que se forma como gotas en el lado interno caerá nuevamente a la bandeja, en vez de deslizarse por la cubierta hasta los canales de recolección. Excepto por condiciones temporales como por ejemplo la puesta en marcha se deberán evitar todas las pérdidas posibles.

Otros factores que determinan la decisión del material de la cubierta incluyen el costo del material, su peso, la expectativa de vida, la temperatura máxima de tolerancia, la disponibilidad local, la resistencia a los impactos, así como la capacidad de transmitir la energía solar y la luz infrarroja. En la tabla 2 (apéndice) se comparan varios materiales para la cubierta basada en estos factores.

Se puede apreciar que una de las mejores opciones es el vidrio templado, tanto en su capacidad para soportar altas temperaturas como en su capacidad para formar la capa de agua. Este vidrio es también de tres a cinco veces más resistente a los impactos que el vidrio ordinario lo que hace que sea más seguro trabajar en este material.

La segunda mejor opción viene siendo el vidrio ordinario, aparte de ser muy económico, permite una buena formación de las capas de agua. Cuando estos vidrios salen de la fábrica poseen una capa de aceite que debe ser limpiada con detergente ya que esta capa reduce la transmisividad y reduce la capacidad para formar las capas. Si se elige este tipo de vidrio un buen espesor para evitar la fragilidad es de 3 mm (1/8 in) [10].

Si bien algunos plásticos tienen un costo menor que los vidrios templados y una mayor resistencia al impacto que los vidrios en general, estos plásticos tienen una baja

capacidad para formar el condensado en capas de agua, que como se vió con anterioridad es un factor importante a la hora de seleccionar el material.

La cubierta del modelo está constituida por vidrios ordinarios, este permite la transmisión de la radiación solar al interior del sistema y la condensación del vapor de agua en el interior de los vidrios. El deterioro del vidrio se prolonga mucho mas que el acrílico que sufre daños debido a las condiciones de operación del modelo, así como la temperatura, exposición directa con el agua de mar y la intemperie que arrastra partículas de polvo y tierra, además de ser un ambiente salino.

3.3.3. BANDEJA

La bandeja contiene el agua salada que será destilada, por lo tanto debe ser impermeable y oscura (preferiblemente negra) de manera que pueda absorber mejor la radiación solar y convertirla en calor. Deberá tener también una superficie relativamente pulida o lisa que permita una fácil limpieza de cualquier sedimento.

Existen dos tipos generales de bandejas. El primer tipo es de aquellas hechas en un material que mantiene su forma y provee la impermeabilidad por si mismo o por medio de la ayuda de un material superficial aplicado directamente sobre él. El segundo tipo usa una combinación de materiales, uno primero (por ejemplo madera) para dar la forma, y un segundo que es colocado sobre el primero. Este ultimo se adapta a la forma dada por el material estructural y sirve como material impermeable. No hay un material que sirva para todas las circunstancias o locaciones. La tabla 3 (apéndice) muestra varios materiales y los compara acorde con ciertas características o propiedades deseables para esta aplicación.

La selección del material para la construcción de la bandeja es uno de los puntos mas difíciles en el diseño de un destilador solar. Las condiciones de corrosión pueden ser tan severas que las bandejas hechas de metal, aun aquellas tratadas con materiales anticorrosivos, tienden a corroerse rápidamente. Por ejemplo las bandejas fabricadas en

cobre son corroídas en solo pocos años. El acero galvanizado o el aluminio sin tratamientos se corroen en solo meses. Esto ocurre también con los aluminios tratados que se emplean en la construcción de embarcaciones. Hay muchas reacciones químicas de oxidación que se multiplican al doble por cada 10° de incremento en la temperatura [10].

Los aceros protegidos por cerámicos duran solo unos años antes de ser degenerados por la corrosión. El cristal especial usado para las porcelanas es soluble en agua, y dentro de un destilador solar solo es cuestión de poco tiempo antes de que empiece a disolverse. La vida típica de los destiladores solares equipados con bandejas de este tipo es de solo 5 años aunque se pueden mantener activas por mas tiempo reparando las fugas con silicona.

También se ha intentado el uso de concreto ya que es un material barato y de fácil manejo, pero la tasa de fallas ha sido mayor porque desarrolla grietas en el primer año, o un poco mas tarde. Por otro lado tanto el concreto como el asbesto absorben agua. Los depósitos y cisternas suelen hacerse en concreto, pero en un destilador solar esto cambia. Cualquiera parte que sea expuesta al aire exterior permitirá evaporación, debido a que es agua salada la que está siendo evaporada, los cristales de sal se formarán en el concreto cerca de la superficie y lo romperán, volviéndolo polvo, lo que contaminaría el agua.

Si bien algunos plásticos son de fácil manejo y bajo costo presentan como complicación las temperaturas a las cuales se funden y una inestabilidad en la conducción de calor a lo largo de la plancha, lo cual no permite que exista una uniformidad de temperatura. Los epóxicos y las resinas de poliéster pueden transmitir olor y sabor al agua destilada. Los investigadores han determinado que este problema no puede ser eliminado cubriendo estos materiales con una capa de acrílico o algún otro material, ya que el olor es capaz de emigrar a través de la capa protectora. Finalmente una bandeja o canales de recolección fabricados en fibra de vidrio, desarrollan grietas al estar sujetas durante años a la acción del agua caliente.

Una alternativa, es el uso de aluminio común recubierto con silicona. Las bandejas hechas con este material incrementan su vida a un rango de 10 a 15 años.

Los destiladores donde la profundidad del agua en la bandeja es 5 cm o menos el rendimiento se puede incrementar hasta un 14% adicional. Pero este rendimiento disminuye en la medida en que aumenta la profundidad del agua [10].

La solución que se tomó para fabricar el evaporador (bandeja de depósito de agua salada dentro del modelo) es el acero galvanizado. Este provocará el calentamiento del agua de mar y a su vez la evaporación de la misma, esta placa será recubierta con una capa de pintura protectora antioxidante y de pintura negra mate que simulará el efecto de un cuerpo negro, esta capa debe soportar la constante inmersión en agua salada, temperaturas entre 60 y 70 °C y el efecto de los rayos solares que hacen que esta pierda su color negro y uniformidad original. Con respecto al espesor de la placa se tiene que, grandes espesores retardan el proceso de calentamiento de la placa provocando que el destilador empiece a operar efectivamente en un tiempo mayor que el caso donde el espesor de pared de la placa es delgado, pero tiene como ventaja que tardará más en enfriarse por lo que operara por un mayor tiempo en la noche.

3.3.4. AISLANTE Y SELLOS

El aislante es usado para evitar la pérdida de calor del destilador e incrementar su desempeño. Comúnmente el aislamiento es colocado bajo la bandeja, debido a que esta área es la más susceptible a la pérdida de calor.

El incremento en el rendimiento por el uso de aislante no es notable en aquellas localidades donde la cantidad de radiación solar es en extremo grande. La solución más económica para el aislamiento es colocar el destilador sobre la tierra, que posee una buena capacidad de drenaje y permite que la misma se mantenga seca.

El aislamiento usado en el modelo desarrollado está conformado por dos secciones, una de ellas es una lámina de corcho, la cual está en contacto directo con la placa metálica (evaporador) y dispuesta sobre la segunda sección de aislante formada por cavidades rellenas de aserrín, incrementando así el efecto aislante.

Si bien los sellos no son uno de los componentes principales, son importantes para una operación eficiente del destilador. Estos son usados para asegurar la cubierta a la estructura de soporte, absorbiendo las deformaciones entre los distintos materiales, debido al calor y mantener toda la estructura herméticamente sellada.

Idealmente debe usarse un sellador que cumpla con los requisitos generales dados al principio de esta sección, sin embargo la selección de éste está supeditada a la disponibilidad en el mercado y por supuesto a los costos del material. Una de las desventajas del uso de selladores de baja calidad es la frecuente intervención que se requiere para mantener en condiciones de servicio al destilador.

La aplicación del material sellador puede tener dos implicaciones, el sellado imperfecto que podría causar que gotas de agua de lluvia entren al destilador portando microorganismos los cuales podrían contaminar el agua y la segunda condición es que el sellador no debe desprender olores o sabores que afecten la calidad del agua haciéndola desagradable al gusto o al olfato.

Los selladores tradicionales, disponibles fácilmente en el mercado incluyen:

- Macilla para sellos de ventana
- Productos asfálticos
- Plástico con recubrimiento de alquitrán

- Silicona

Otros selladores disponibles son el látex, látex acrílico, caucho, gomas sintéticas, poliuretano y polietileno. Muchos de estos pueden ser mas costosos que los tradicionales, pero poseen una mayor expectativa de vida útil.

De éste grupo de selladores, el etileno propileno (termopolímero EPDM) parece ser el mas prometedor, los selladores de gomas de silicona de tubo (comúnmente usadas en albañilería) son la mejor elección, aunque existen reportes de algunos casos aislados de degradación y falla de los sellos de este tipo desde los 5 hasta los 15 años [22] después de haber sido expuesto a los rayos solares.

Como nota final, debe recordarse que un sellador que trabaja muy bien en ventanas de edificaciones no asegura un buen funcionamiento en un destilador solar, debido a las altas temperaturas, presencia de humedad y el hecho de que el agua debe ser potable y atóxica.

La hermeticidad entre las partes del modelo, específicamente en las zonas donde se condensa el vapor de agua se logra sellando las uniones con un tipo de silicona, el cual resiste las condiciones de trabajo como alta humedad y temperatura.

3.3.5. SISTEMA DE TUBERÍAS.

El sistema de tuberías esta dividido en un sistema de alimentación de agua dentro del destilador desde la fuente de abastecimiento, y de recolección de agua destilada desde el destilador al deposito de almacenamiento.

Mientras que el acero inoxidable es preferido, el polibutileno es un material con un comportamiento satisfactorio. El polietileno negro se ha mantenido a la vanguardia por lo menos en los últimos 15 años en el uso de tuberías de drenaje. Las tuberías de nylon

tienden a desmenuzarse si son expuestas a la luz solar directa de 5 a 10 años. Las tuberías de PVC (cloruro de polivinilo) presentan un comportamiento tolerable, sin embargo durante las primeras semanas de operación del destilador emiten un gas, transmitiendo un mal sabor al agua destilada. Las tuberías de vinilo común no son aceptables. Existe un tipo de vinilo el cual puede ser usado para empaque de alimentos, este podría ser usado de forma satisfactoria en las tuberías del destilador, pero la exposición a los rayos solares termina por degradar al material. Esto mismo ocurre con el polietileno de alta densidad usado en los empaques de agua, leche o jugos.

La recolección de agua dulce condensada y la salida de la salmuera del sistema es por medio de tuberías de plástico, evitándose así la corrosión que ocurriría si se usasen tuberías de algunos metales y logrando una disminución en los costos.

En la tabla 4 (apendice) se presenta una comparación de las propiedades de algunos de los plásticos mas usados.

3.3.6. DEPÓSITO DE ALMACENAMIENTO

Al seleccionar los materiales para el depósito de almacenamiento se deben tener en cuenta ciertas precauciones El agua destilada es químicamente agresiva, hasta cierto momento en el cual la tasa de reacciones químicas disminuye notablemente. Las consecuencias prácticas son que algunos materiales como el acero, acero galvanizado, cobre, bronce y soldaduras, son disueltos en el agua destilada, provocando daños o destrucción de los componentes del tanque y muy probablemente la contaminación del agua. El acero inoxidable (tipo 316) es una buena elección. Los tanques de laboratorio contruidos en polipropileno representan una alternativa, pero no pueden ser expuestos a los rayos del sol. El acero galvanizado durara solo unos pocos años, desprendiendo partículas de zinc y hierro al agua. El concreto podría servir, una vez mas con la expectativa de que el concreto se deteriore lentamente a lo largo de los años. De hecho una manera de prevenir tales ataques químicos es introducir piedras porosas dentro de la corriente de agua

destilada, o en el propio deposito, para recoger algunas partículas de carbonato de calcio, esto disminuirá el ataque en el propio tanque.

Deben tomarse extremas precauciones para evitar la entrada de insectos y gérmenes, puede usarse una malla fina (de aproximadamente 50 hilos por pulgada) cubriendo la entrada de ventilación del tanque. La capacidad de almacenamiento debe ser de aproximadamente 4 o 5 veces el promedio diario de producción del destilador.

El depósito de agua dulce producida por el sistema, es un envase plástico de capacidad igual o levemente mayor a la producción de un día por la planta.

3.3.7. SUMARIO DE MATERIALES RECOMENDADOS.

Los mejores materiales para la construcción de un destilador donde el objetivo es el mas bajo costo del agua, en un ciclo de vida del destilador de 20 años, son:

- Una capa de compuesto epoxico para oscurecer el fondo de la bandeja;
- Travesaños metálicos para ser usados como soporte de la bandeja;
- Alrededor de 25 a 38 mm de aislante entre los travesaños (como por ejemplo uretano de alta temperatura o fibra de vidrio);
- Una base cobertora de acero galvanizado liviana, o una hoja de aluminio;
- Estructuras laterales de metal tales como aluminio extruído, para soporte del destilador;
- Canales de acero inoxidable;

- Vidrios templados de bajo contenido ferroso, o vidrio común de ventanas (de doble espesor);
- Acero inoxidable tipo 316 para las conexiones de las mangueras (el PVC es aceptable pero pobre en condiciones de altas temperaturas);
- Un espejo detrás del destilador en localidades de altas latitudes.

Aunque los diseños con estos materiales representan destiladores de alto coste, probablemente sean una buena inversión debido a que los destiladores de bajo costo no logran mantenerse en el tiempo. En comparación con el transporte de agua purificada en botellas o tanques, el destilador solar puede en muchos casos llegar a ser una opción mas económica.

3.3.8. SUMARIO DE MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL DESTILADOR

La descripción de los materiales utilizados es como sigue a continuación:

- Base: Madera tipo Compuesto Panforte
- Travesaños de la Base: Madera tipo Palo Blanco
- Perfiles bases anterior y posterior: Madera tipo Palo Blanco
- Tapa posterior : Madera tipo Compuesto Panforte
- Tapas laterales: Lamina de acrílico

- Perfiles: Madera tipo Apamate
- Recubrimiento de las piezas hechas con madera: Primera capa: sellante de madera, Segunda capa: plástico líquido “Exterior marino satinado” de Reiplast
- Bandeja: Lamina de acero galvanizado lisa 4' X 8' calibre 26
- Recubrimiento de la Bandeja: Fondo para recubrimientos y promotor de adherencia “Epomon multi prime” de Montana
- Pintura de Bandeja: Pintura epoxica negra, “Epoxi aducto amina”
- Aislantes: Corcho de 25 mm de espesor
- Cubierta: Vidrios comunes de ventanas de 3 mm de espesor
- Sellante de los Vidrios: Silicona Silipex Rojo (marina)
- Colectores de agua dulce: Tuberías de plástico de 3/8”
- Drenaje de salmuera: Tubería de plástico de 3/8”
- Entrada de agua: Tubería de plástico de 3/8”
- Depósito de agua dulce: Envases de plástico

3.4. COSTOS DE FABRICACIÓN

A continuación se muestra un listado detallado de los costos de cada uno de los componentes del modelo:

- 1 Base , 1 Tapa y 3 travesaños: Bs. 30.800
- Perfiles Base anterior y posterior: Bs. 9.000
- 2 Tapas laterales de acrílico: Bs. 3.000
- 2 Perfiles con sellante aplicado : Bs. 33.000
- Plástico liquido para exterior marino (satinado): Bs. 5.000
- Bandeja: Bs. 9.750 + Bs. 10.000 (trabajo de doblado y puntos de soldadura)
- Recubrimiento de la Bandeja : Bs. 18.650
- Pintura negro mate (Montana): Bs. 18.680
- Láminas de corcho: Bs. 15.240
- 2 Vidrios: Bs.20.000
- Silicona (sellador de vidrios) : Bs. 2.850 x 2 = 5.700
- Manguera (4 mts): Bs. 1.000

- Tubo de plástico (2 mts): Bs. 1.870
- Clavos y tornillos: Bs. 1.000
- Conexiones y válvula: Bs. 6.000

Total de costos de materiales: Bs. 188.690,00

3.5. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Dado que el modelo está compuesto por elementos simples, realizar el mantenimiento es muy sencillo, a continuación se dan unas pautas de mantenimiento a seguir para el funcionamiento óptimo del modelo:

- Desinfectar el interior del destilador y el sistema de tuberías con componentes clorados (por ejemplo añadir algunas gotas de cloro de lavar al agua, pueden hacer un buen trabajo).
- Proveer de un filtro, para la ventilación, que evite la entrada de insectos o algunas otras impurezas de gran tamaño.
- Se debe extraer el agua remanente del día anterior (salmuera), mas no es necesario vaciarlo completamente.
- Al inicio de cada día de operación llenar la bandeja con aproximadamente 3cm de altura. Este proceso debe hacerse en las primeras horas de la mañana, antes del alba debido a que cuando el sol se oculta al final del día el destilador sigue trabajando durante un tiempo adicional.

- Debe tenerse cuidado de no tocar la parte interna de los vidrios
- El calentamiento del agua de alimentación es una buena opción siempre y cuando no represente un costo adicional, por ejemplo, el uso de un intercambiador de calor entre el agua de alimentación y la destilada.
- No debe usarse el agua destilada por la planta durante los primeros 2-3 días de operación, debido a que esta puede estar contaminada
- Es importante que las botellas donde se deposita el agua destilada se encuentren limpias y posean una capacidad ligeramente mayor al promedio de producción diaria de agua destilada, es recomendable que la salida de los colectores esté conectada directamente y de forma cerrada a la botella de depósito de agua destilada, así se previene contaminación de esta.
- Se debe mantener el área de funcionamiento de la planta limpia para mantener la calidad del agua destilada.
- Limpiar los vidrios periódicamente con el agua y un haragán.
- Los lados externos de los vidrios deben limpiarse luego de lluvias.
- La Bandeja debe ser limpiada con un flujo de agua para arrastrar partículas de sal formadas en esta, el flujo puede ser de agua de mar.

CAPÍTULO IV

PROCESO DE FABRICACIÓN

4.1. LA ESTRUCTURA:

La estructura esta formada por una base que sirve de apoyo, sobre esta van dispuestos tres listones de madera que sirven de espacio para el aislante. Adicionalmente en la parte anterior y posterior se encuentran las estructuras de soporte, sobre las que se apoyaran los vidrios y los perfiles.



Figura 4.1

Luego de esto se procedió a la unión de todas las partes que conforman la estructura comenzando por el piso base, a este se le fijan los listones y las estructuras de soportes anteriores y posteriores.

Sobre las 3 barras de madera, se colocó el aislante de corcho negro, es importante acotar que el espacio entre las barras de madera se llenó de aserrín para incrementar el aislamiento del sistema.

Sobre la estructura de soporte anterior se fijó el perfil donde se apoya el vidrio superior. Posteriormente se colocaron las tapas laterales de acrílico y la posterior de madera.

El perfil de soporte del vidrio inferior fue fijado a las tapas laterales de acrílico y como ayuda de soporte este descansa sobre 2 piezas metálicas que a su vez están fijadas a la estructura de soporte anterior.

Se hicieron las perforaciones necesarias para las tuberías de entradas de agua, salidas de agua destilada, drenaje de la salmuera y también las perforaciones para introducir los termómetros.



Figura 4.2

4.2. LA BANDEJA:

La lámina de acero galvanizado fue llevada a las dimensiones 139 x 91cm mediante una guillotina se le hicieron 4 cortes de 5cm. en los extremos de la lámina como se indica en la figura 4.3

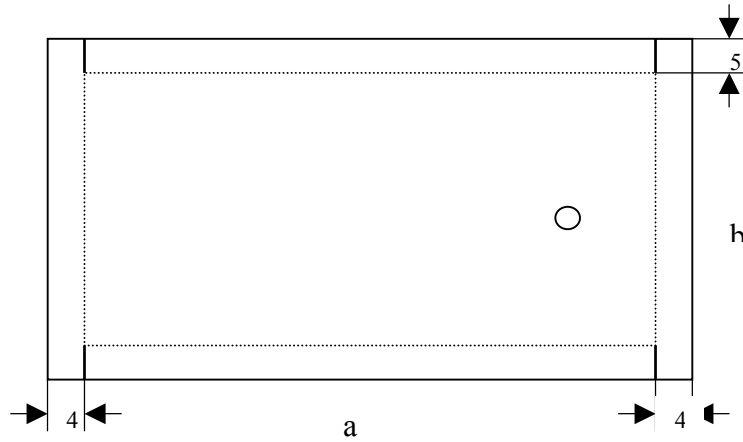


Figura 4.3

Seguidamente se procedió a doblar las pestañas (a) para luego formar las esquinas como se muestra en la figura 4.4.

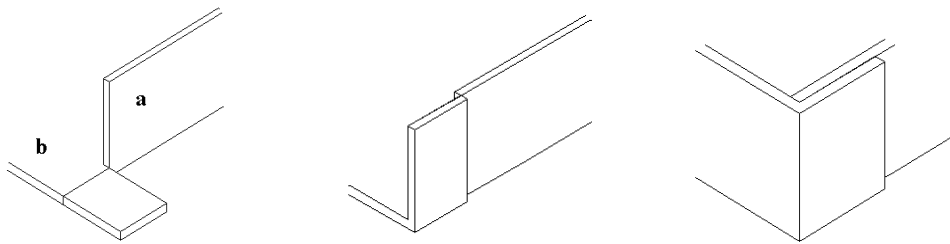


Figura 4.4

Se hizo un agujero en la lámina para el desagüe de la salmuera y se introdujo a través de este una manguera que luego fue sellada.

La lámina fue recubierta por una base antioxidante “ Multiprime” que promueve la adhesión de la siguiente capa de pintura “Epomon aducto amina” de color negro, así quedó por terminado la bandeja absorbadora de calor.

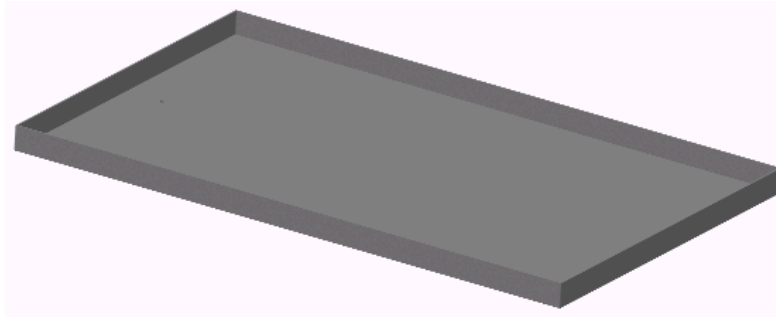


Figura 4.5

Por último la bandeja se introdujo en la cavidad de la estructura, sobre el aislante y se procedió a sellar todos los bordes con silicona para evitar el pasa de agua y/o vapor hacia el aislante.

4.3. CUBIERTAS DE VIDRIO:

Sobre la tapa posterior se colocaron los apoyos del vidrio inferior. Una vez que se sellaron todas las juntas internas se colocó el primer vidrio. En el perfil que sostiene el vidrio se coloca una tapa que aparte de funcionar como seguro también ayuda en la labor de sello, evitando así que el agua salada que se desliza sobre el lado superior del vidrio superior se introduzca en el canal de recolección de agua destilada. En la figura 4.6 se aprecia esta tapa.



Figura 4.6

Luego de que el primer vidrio fue colocado se sellaron los bordes con silicona para evitar el paso de vapor de la primera etapa hacia la segunda etapa. Seguido a esto se

procedió a colocar la entrada de agua de la segunda etapa, ya que la misma queda encerrada entre los dos vidrios.

Al colocar el segundo vidrio se utilizó como apoyo en la tapa posterior el sistema de entrada de agua de la segunda etapa. A este vidrio se le realiza el mismo procedimiento de sellado que al primero inclusive la tapa que recae sobre el perfil, esta última también permite que el sello de silicona no se agriete o despegue como consecuencia de vibraciones.

4.4. ACCESORIOS

Se conectaron las mangueras a los diferentes sistemas de entrada y salida de agua. La salida de agua destilada está conectada a unos recipientes herméticos, esto debido a que parte del vapor se escapa por estas salidas y termina condensándose en los recipientes.

Se conectó la manguera de entrada de agua de la segunda etapa a una válvula que a su vez está conectada al depósito de agua salada, este flujo de agua se da por gravedad y es regulado por medio de una válvula.

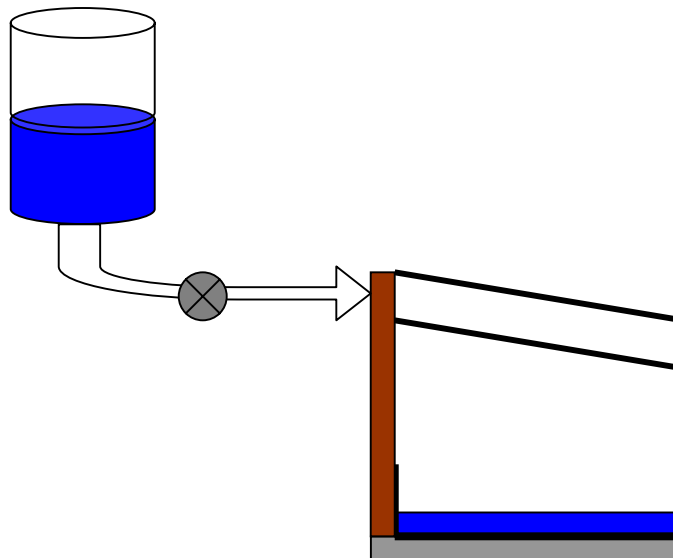


Figura 4.7

Como solución al problema de la entrada de agua de la segunda etapa se implantó un método de distribución para lograr que el agua se deslizara uniformemente sobre el vidrio, este consiste en una tubería dispuesta de forma horizontal con pequeños agujeros a lo largo de la misma y cubierta por un material permeable, lo cual que permite que poco a poco este material se vaya cargando de agua y en el momento en que se satura, libera el exceso de agua de forma uniforme a lo largo de todo el material formando una película delgada de agua sobre el vidrio.



Figura 4.8

Por último se sellaron con silicona todas las juntas y conexiones para evitar fugas. Se debe tomar en cuenta que los sellos tienen un tiempo mínimo de secado dependiendo de la silicona usada, que para este caso se recomiendan 48h. para evitar que el agua destilada absorba olores y/o sabores que puedan desprenderse de la silicona.

CAPÍTULO V
PRINCIPIO TERMODINÁMICO

5.1. BALANCE DE ENERGÍA.

5.1.1. ABSORCIÓN DE CALOR EN LOS VIDRIOS

Si consideramos un rayo de sol que incide sobre un vidrio (medio semitransparente) sabemos que parte de la irradiación se reflejará se absorberá y se transmitirá.

Aceptamos los siguientes valores tomados de Incropera:

$$\alpha = 2\%$$

$$\rho = 10\%$$

$$\tau = 88\%$$

El efecto que se lleva a cabo en las cubiertas un destilador solar de tipo simple de n etapas sería considerar el rayo transmitido en la etapa i como incidente en la etapa $i+1$ y el rayo reflejado como un nuevo rayo incidente en la etapa $i-1$. En la figura 5.1 se muestra este efecto:

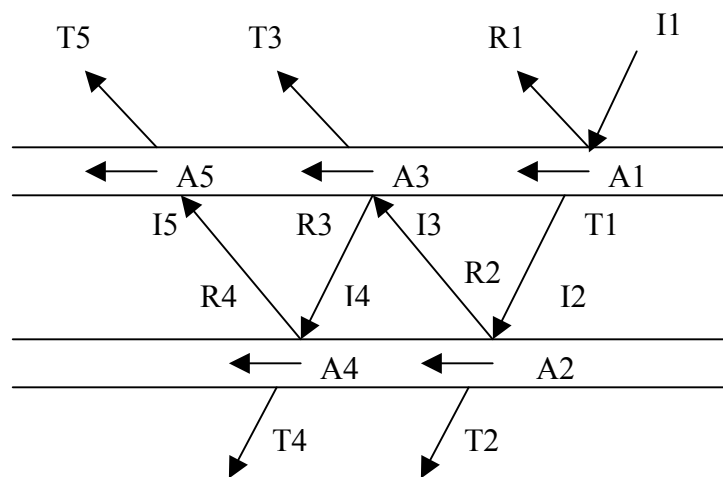


Figura 5.1 Incidencia de un rayo I sobre dos vidrios

Como se puede apreciar en el esquema este efecto se repite infinitamente, para efectos de cálculos se desprecian los valores cuando se llega a un porcentaje inferior al 1% del rayo incidente inicial.

Para obtener el porcentaje de absorción de uno de los vidrios se suman los diferentes porcentajes parciales absorbidos por dicho vidrio. El porcentaje total de irradiación cedida a la atmósfera sería la suma de los porcentajes parciales de los rayos que abandonan el vidrio superior.

Los porcentajes obtenidos para un destilador de 2 etapas (2 cubiertas) son los siguientes:

- Absorbido por el vidrio superior (2) = 2.1%
- Absorbido por el vidrio inferior (1) = 1.7%
- Cedido a la atmósfera = 17.7%
- Entrante a la bandeja = 77.44%

5.1.2. BALANCE DE ENERGÍA DEL DESTILADOR

A continuación se presenta el estudio termodinámico del destilador, se debe tomar en cuenta que el proceso llevado a cabo en el vidrio de la segunda etapa difiere del proceso que ocurre en la primera etapa, se hará el análisis por separado para cada una y también se llevará a cabo un análisis del proceso de evaporación que ocurre en la bandeja.

Cubierta superior:

Para realizar el balance energético se define un volumen de control como el que se muestra en la figura 5.2.

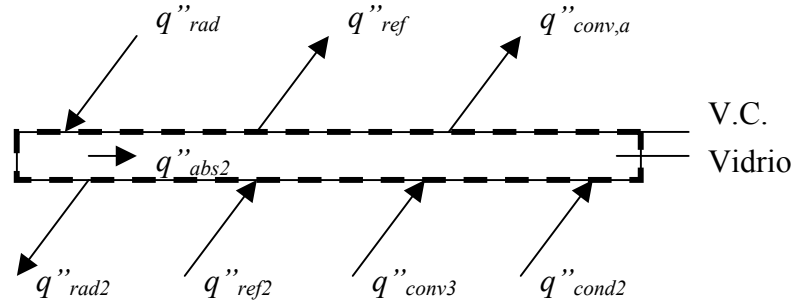


Figura 5.2 Volumen de control de la cubierta superior

Al aplicar la primera ley de la termodinámica para el volumen de control mostrado en la figura 5.2 tenemos:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \cdot h_e - \sum \dot{m}_s \cdot h_s \quad (5.1)$$

con

$$\frac{dE}{dt} = 0, \quad \dot{W}_{v.c.} = 0,$$

$$\sum \dot{m}_e \cdot h_e = \sum \dot{m}_s \cdot h_s = 0$$

por tanto

$$\dot{Q}_{v.c.} = 0 \quad \dot{Q}_e = \dot{Q}_s$$

introduciendo los términos de calor, obtenemos:

$$(q''_{rad} + q''_{ref2}) + q''_{conv3} + q''_{cond2} = (q''_{rad2} + q''_{ref} + q''_{abs2}) + q''_{conv,a}$$

debido a que

$$(q''_{rad} + q''_{ref2}) \approx (q''_{rad2} + q''_{ref} + q''_{abs2})$$

obtenemos finalmente

$$q''_{conv3} + q''_{cond2} = q''_{conv,a} \quad (5.2)$$

para la ecuación 5.2 los valores de q'' están dados por:

$$q''_{conv3} = h_{\infty 2} \cdot (T_{\infty 2} - T_{s,3})$$

$$q''_{conva} = h_{\infty} \cdot (T_{s,4} - T_{\infty})$$

de la ecuación 2.27

$$q''_{cond2} = \bar{h}_f \cdot (T_{cl} - T_{s,3}) = \dot{m}_{cond2} \cdot h_{fg@Tf}$$

Cubierta inferior:

Para realizar el balance de energía se define el volumen de control como se muestra en la figura 5.3.

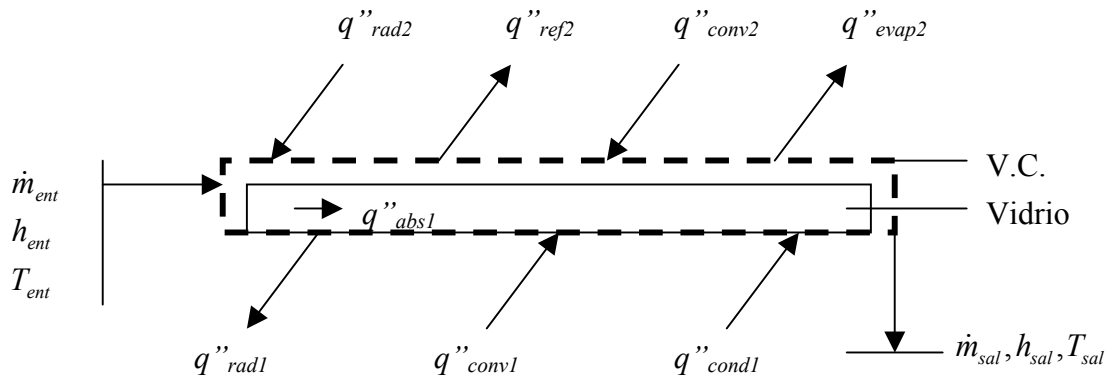


Figura 5.3 Volumen de control de la cubierta inferior

Al hacer un balance de masas (continuidad) obtenemos:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{evap2} + \dot{m}_{sal} \quad (5.3)$$

Al aplicar la primera ley de la termodinámica para el volumen de control mostrado en la figura 5.3 tenemos:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e \cdot h_e - \sum \dot{m}_s \cdot h_s$$

con

$$\frac{dE}{dt} = 0, \quad \dot{W}_{v.c.} = 0$$

en consecuencia

$$\dot{Q}_{v.c.} = \sum \dot{m}_s \cdot h_s - \sum \dot{m}_e \cdot h_e \quad (5.4)$$

donde,

$$\dot{Q}_{v.c.} = (q''_{rad2} + q''_{conv1} + q''_{conv2} + q''_{cond1}) - (q''_{rad1} + q''_{ref2} + q''_{abs1})$$

debido a que

$$q''_{rad2} \approx (q''_{rad1} + q''_{ref2} + q''_{abs1})$$

$$\dot{Q}_{v.c.} = q''_{conv1} + q''_{conv2} + q''_{cond1} \quad (5.5)$$

$$\sum \dot{m}_e \cdot h_e = \dot{m}_{ent} \cdot h_{ent} \quad (5.6)$$

$$\sum \dot{m}_s \cdot h_s = \dot{m}_{evap2} \cdot h_{fg@Tf} + \dot{m}_{sal} \cdot h_{sal} \quad (5.7)$$

sustituyendo 5.5, 5.6 y 5.7 en 5.4 obtenemos:

$$q''_{conv1} + q''_{conv2} + q''_{cond1} = \dot{m}_{evap2} \cdot h_{fg@Tf} + \dot{m}_{sal} \cdot h_{sal} - \dot{m}_{ent} \cdot h_{ent} \quad (5.8)$$

de la ecuación 2.27 tenemos:

$$\dot{m}_{evap2} \cdot h_{fg@Tf} = h_m \cdot (\rho_{v,cl} - \rho_{v,\infty2}) \cdot h_{fg}$$

Evaporador:

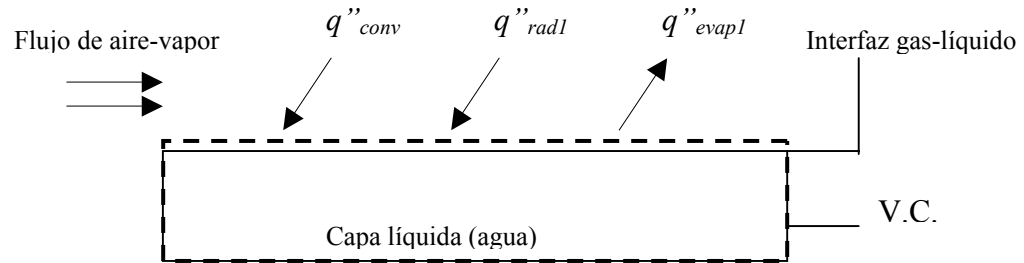


Figura 5.4 Volumen de control en el evaporador

Para realizar el balance de energía se define el volumen de control como se muestra en la figura 5.4.

Se desprecia el calor añadido por el flujo masico que proviene de la etapa II,

Al aplicar la primera ley de la termodinámica para el volumen de control mostrado en la figura 5.4 tenemos:

$$\dot{Q}_{v.c.} = \sum \dot{m}_s \cdot h_s - \sum \dot{m}_e \cdot h_e$$

donde

$$\dot{Q}_{v.c.} = q''_{conv} + q''_{rad1} \quad (5.9)$$

$$\sum \dot{m}_s \cdot h_s = \dot{m}_{evap1} \cdot h_{fg@Tf} \quad (5.10)$$

$$\sum \dot{m}_e \cdot h_e = 0 \quad (5.11)$$

sustituyendo 5.9, 5.10, 5.11 en 5.4 obtenemos:

$$q''_{conv} + q''_{rad1} = \dot{m}_{evap1} \cdot h_{fg@Tf} = h_m \cdot (\rho_{v,cl} - \rho_{v,\infty 1}) \cdot h_{fg@Tf}$$

Las ecuaciones antes expuestas pertenecientes al estudio termodinámico del destilador suponen un estado estable y flujo estable, sin embargo las temperaturas que definen al sistema varían con respecto al tiempo ($T = f(T)$), por lo que las ecuaciones deben aplicarse para cada instante.

5.2. RENDIMIENTO.

En la mayoría de las unidades, menos de la mitad de la energía irradiada sobre el destilador es usada para obtener el calor de vaporización necesario para obtener agua destilada. Los destiladores comerciales actualmente en el mercado poseen una eficiencia en un rango del 30 al 45% (la máxima eficiencia apenas supera el 60 %).

El desempeño del destilador esta dado por su eficiencia la cual se define como la relación entre la energía usada para evaporar agua de mar y la radiación total caída sobre el destilador, y es expresada como:

$$\eta = \frac{m \cdot h_{fg}}{I}$$

Debido a que los costos de un destilador de este tipo no aumentan mucho a medida que se hacen modificaciones o mejoras al mismo, es rentable el hacer la inversión con el fin de lograr aumentos en la eficiencia. Las mejoras dependen casi siempre de los materiales y métodos de construcción aplicados.

5.3. CALCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE

Para el cálculo del espesor supondremos conducción unidimensional de estado estable, para lo que se tomaran las condiciones críticas donde las temperaturas son máximas. Para definir las ecuaciones se esquematiza el sistema como se muestra en la

figura 5.5, donde se desprecian los efectos de transferencia de calor en los lados del sistema.

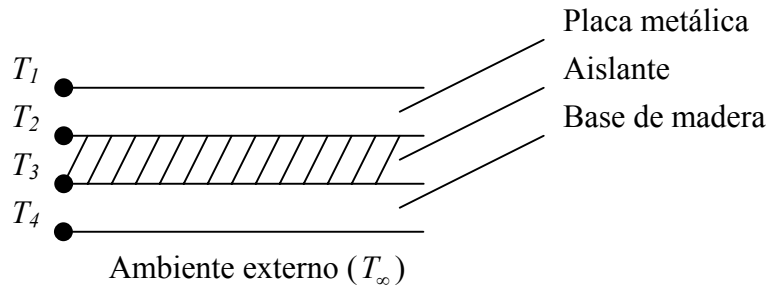


Figura 5.5 Vista lateral del Aislante

Enfocando el problema desde el punto de vista de resistencias térmicas se tiene el sistema equivalente de resistencias como el que se muestra en la figura 5.6 a continuación.

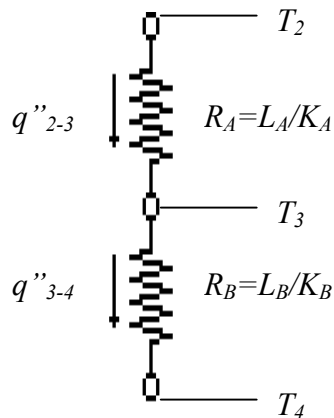


Figura 5.6 Sistema de resistencias térmicas

Considerando la resistencia de la placa igual a cero, o sea $T_1 = T_2$ y suponiendo $T_4 = T_\infty$, escribimos las ecuaciones de flujo de calor para un área de 1m^2 .

El calor cedido desde la placa hacia el ambiente será:

$$q''_{perd} = \frac{(T_2 - T_4)}{R_{tot}} = q''_{2-3} = q''_{3-4} \quad (5.12)$$

donde

$$R_{tot} = \frac{L_A}{K_A} + \frac{L_B}{K_B} \quad (4.13)$$

La temperatura máxima de la placa está en el rango de 55-65 grados centígrados, por lo que tomamos el máximo valor $T_1 = T_2 = 65^\circ C = 338.15K$

La temperatura ambiente se supone como un promedio, así $T_\infty = T_4 = 32^\circ C = 305.15K$.

Se conoce el espesor de la base de madera $L_B = 0.01m$ y los coeficientes convectivos del aislante (corcho) y la base de madera que son respectivamente $K_{A@300K} = 0.045W / m \cdot K$ y $K_{B@300K} = 0.12W / m \cdot K$.

Para diferentes espesores de aislantes (L_A) y sustituyendo en las ecuaciones de calor se tiene que el calor cedido al ambiente y los porcentajes de calor:

- $L_A = 0$ $q''_{perd} = 396W / m^2$
- $L_A = 1cm$ $q''_{perd} = 108W / m^2$
- $L_A = 2cm$ $q''_{perd} = 62.53W / m^2$
- $L_A = 3cm$ $q''_{perd} = 44W / m^2$

En la figura 5.7 se muestra el comportamiento del calor cedido al ambiente con respecto a diferentes espesores de aislante. La línea de tendencia que lo representa es

logarítmica por lo tanto el criterio usado para elegir el espesor del aislante será la disponibilidad de mercado. A partir de 2 cm la reducción de pérdida de calor a medida que aumenta el espesor del aislante es cada vez menor, por tanto no se justifica la adquisición de un aislante de mayor espesor para obtener el mismo efecto.

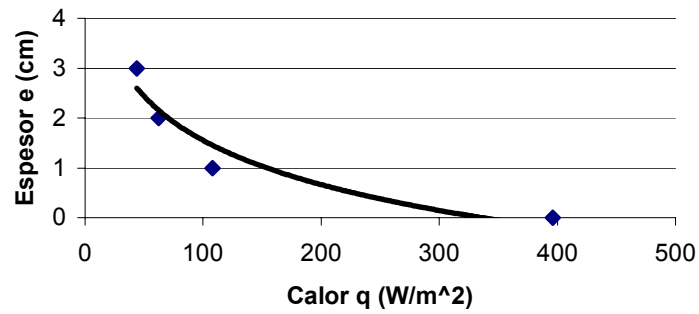


Figura 5.7

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

6.1. INSTALACIÓN

La instalación del modelo para la prueba se llevo a cabo en la población de Higuerote del estado Miranda, la cual es una localidad costera. Se instalo el modelo de manera tal que la cara anterior apuntase al sur, esto es debido a que Venezuela se encuentra en una latitud norte, lo que ocasiona que el sol realice su recorrido de este a oeste con un leve ángulo hacia el sur, entonces si la cara del modelo que presenta los cristales es dirigida hacia el sol, se aprovechara mejor la incidencia de los rayos, y se asegura la mínima cantidad de sombra sobre la bandeja.

En una primera prueba se noto que se presentaban fugas en ciertas partes de la planta, las cuales posteriormente fueron reparadas reforzando y verificando los sellos de silicona.

En esta misma prueba se noto que los canales de recolección de agua presentaban una falla debido a que en el espacio (no sellado) existente entre la manguera de recolección y el perfil se depositaba agua que luego se perdía, esta falla fue resuelta quitando la manguera de los canales, en las figuras 6.1.a y 6.1.b se puede apreciar esta falla y su corrección respectivamente.

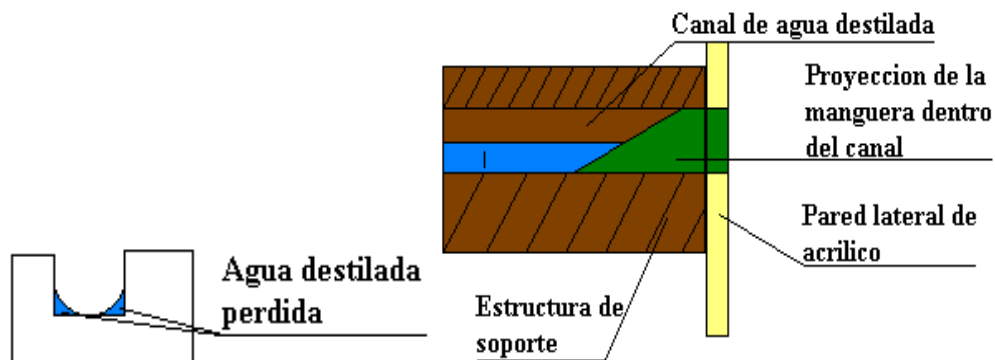


Figura 6.1.a y 6.1.b

6.2. PUESTA EN MARCHA

Para comenzar a operar la planta la primera tarea consiste en llenar la bandeja, el modelo posee una entrada de agua principal directo a la bandeja, así pues la bandeja se lleno con 20 litros de agua que representan 2 cm de altura en la bandeja, tomando en cuenta que el agua de entrada de la segunda etapa incrementara esta altura hasta un máximo de 3,5 cm lo cual queda dentro del rango recomendado de profundidad (véase capítulo 2) para un óptimo rendimiento.

Se calibra la válvula de entrada de agua de la segunda etapa para un caudal de 2 lts/hora, ya que esto asegura una película de agua lo suficientemente delgada y a una velocidad lo suficientemente baja como para lograr una mayor absorción de calor, incrementándose de esta manera la producción. Esta etapa no opera desde el comienzo del día sino que comienza a operar una vez que la primera etapa empieza el proceso de evaporación. Esta entrada de agua se cierra una vez que la producción de agua destilada disminuye notablemente.

Las mediciones de las temperaturas se hicieron cada hora para así poder tener un perfil del comportamiento de estas a lo largo del día. El inicio de operación del modelo comienza con la salida del sol justo al amanecer ya que desde ese momento la lamina empieza a absorber energía, y culmina un tiempo después de ocultarse el sol debido al calor remanente en la bandeja y el agua.

Una vez concluido el proceso al final del día se debe drenar la salmuera contenida en la bandeja ya que esta posee mayor concentración de sales disueltas y de ser operada la planta al siguiente día con esta salmuera el rendimiento disminuirá, o sea, la cantidad de agua producida al día siguiente será menor debido a que existe un menor volumen de agua dentro de la salmuera.

6.3. ENSAYOS

Los ensayos fueron llevado a cabo durante 5 días, en un periodo desde 6 a.m. hasta 7 p.m., de los cuales dos fueron días de mucha lluvia, se registraron valores de temperatura en intervalos de una hora de los ambientes internos, la bandeja, el agua depositada en la bandeja, el agua de entrada, las condiciones atmosféricas (temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco) y el agua destilada. En la figura 6.2 se muestra a que partes del modelo corresponden las temperaturas medidas.

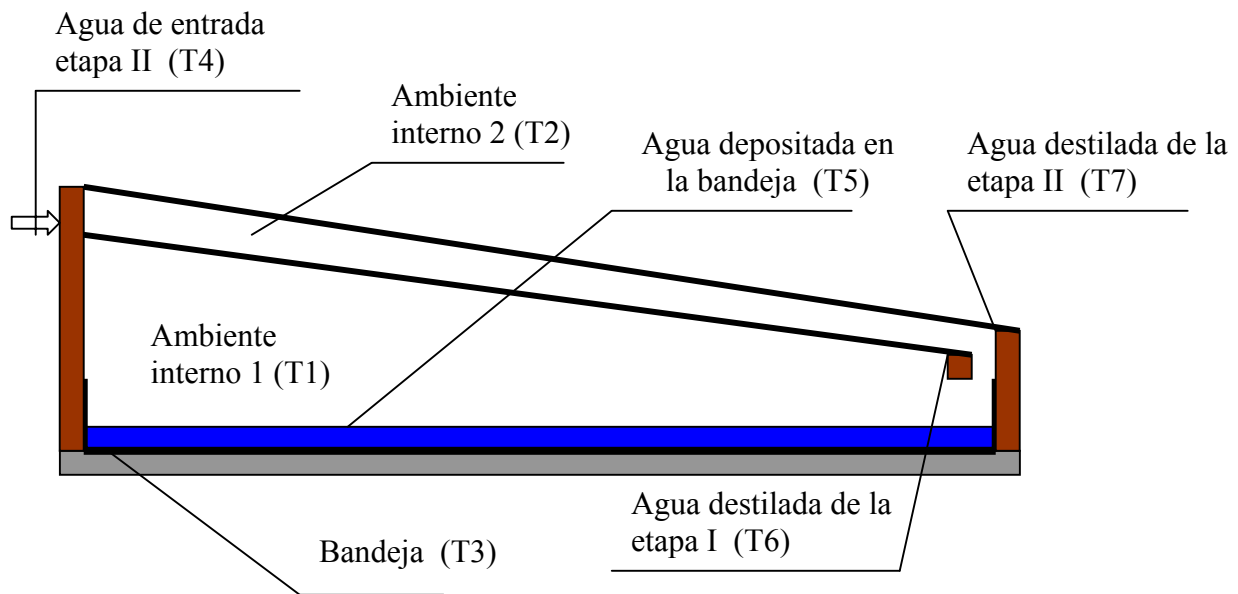


Figura 6.2

En las siguientes tablas se pueden apreciar los datos de temperatura medidos en los días de prueba.

Tablas de datos de temperatura tomados al modelo(T °C)

Dia 1 13/09/2001

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Tbh	Tbs
6									
7									
8									
9									
10									
11								26,1	28,3
12	47,4	45,2	43,4	29,9	41,1			29,3	30,5
13	57,3	53,7	51	32,1	53			28,3	32,1
14									
15									
16									
17									
18									
19									

Dia 2 17/09/2001

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Tbh	Tbs
6									
7									
8	34,3	31,7	31,2		32,1			26,8	27,6
9	43,3	40	40,1		40,6			26,4	30,2
10	56	54,8	52,1	32,3	52,1			27,8	39,6
11	70,8	60	64,8	35,5	64,7	40,2	34,2	28,7	37,8
12	75,4	66,5	67,6	35,4	68,3	47,1	40,9	27,7	32,5
13	64,3	55	61,3	35	61,8			29,9	35,5
14	62,7	55	60,3	34,6	61,6			28,5	29,3
15	61,2	51,8	58,1	34	59,7			27,2	28,2
16	60,9	53,3	58,9	37,6	59,7			29,8	33,7
17	54,9	48	56,1	36,1	56,7			29,9	32,1
18	49,2	41,6	50,4	32,4	51,6	35	31,1	26,4	27,9
19	43,3	38,2	45,2		45,9			26,9	28,6

Tablas de datos de temperatura tomados al modelo(T °C)

Dia 3 18/09/2001

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Tbh	Tbs
6	24,4	23,2	23,5		25,3			22,9	24,3
7	25	23,8	25,4		25,4			23	24,7
8	31,8	31,2	29,1		29,1			25,4	26,6
9	43,5	44	36,8		36,4			29,1	34,2
10	53,9	55,4	49,2		49,5			29	35,8
11	66,1	67	60,9	36	60,9	34,6	38,6	28,3	35,5
12	72,5	68,1	66,1	36	66,3	39,2	39	31,1	35,5
13	76,2	69,8	68,7	37,3	70	40	40,1	29,2	35,6
14	70,8	67,8	69,9	37,9	71,5	41,6	40,4	30,8	35,2
15	68,4	63,4	68,4	36,6	70,1	43,5	36,2	29,4	34
16	67,7	57,3	65,5	35,2	67,6	40,1	35	28,2	33,3
17	61,6	51,4	59,5	36,8	60,7	34,1	32,2	28,1	33,1
18	50,8	45,5	52,3		53,8			26,3	31,2
19	44,6	38,7	46		47,2			25,9	28,4

Dia 4 19/09/2001

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	Tbh	Tbs
6									
7									
8	39,7	37,4	36,3		36,3			28,3	33,1
9	48	46,9	44,4		43,9			28,8	34,6
10	57,6	58,1	55,9	34	57,3			31,8	33,3
11	70,9	68,3	60,5	35,4	62,1	43,6	39,8	28,5	38,9
12	73,2	68,9	67,3	37,8	68,7	45,6	41,8	27,7	33,3
13	69,4	63	67,5	35,5	69,3	43,9	39,2	28,7	31,7
14	70,8	65,4	67,8	34,9	69,6	45,1	46,3	26,9	36,8
15	63,8	61,6	62,8	36,5	63,9	44,1	37	26,9	33,7
16	57,3	49,2	58,2	34,2	58,9	36,7	34,7	26	31,8
17	54,1	47,5	54,1	35,9	54,7	40,7	34,7	28,1	31,3
18	47,2	40,9	49,6		50,5	35,5	31	26,1	28,6
19	41,5	36,7	43,4		44,2	30,1		26	27,7

Los valores obtenidos de cantidad de agua de destilado producida se reportan en la

siguiente tabla. De la misma se obtiene que el promedio de destilación de la planta es de 6.337 L/mts².

Día	1	2	3	4
Producción de agua destilada (l/m ²)	-	5.568	6.506	6.937

El primer día de mediciones no se reportó agua producida debido a las condiciones climatológicas adversas, es decir, la lluvia no permitió operar el modelo. Los siguientes días si bien hubo nubosidad durante las primeras horas de la mañana, el resto del día fue provechoso para realizar las pruebas. El segundo día se presentaron nubosidad y lloviznas pasado el mediodía lo cual representó una baja producción de agua destilada. Las condiciones del tercer día fueron ideales para probar el modelo ya que no hubo precipitaciones sino un poco de nubosidad durante cortos períodos. Para el día 4 unicamente se presentaron nubosidades a las 10:40 a.m. y aproximadamente desde las 2:00 p.m. hasta las 4:00 p.m.

Se tomaron muestras de agua destilada para ser analizadas en laboratorio, el análisis arrojó los siguientes resultados:

Apariencia: Ligeramente turbia.

Color: Incoloro.

Olor: Mantiene un ligero olor a plástico.

Sabor: Presenta sabor a plástico.

pH: 6,42

Dureza: 6,95

Sulfatos: No apreciable.

Nitratos: < 10 mg/L

Cloruros: 134,5 mg/L

6.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En las gráficas 1, 2, 3 y 4 de los apéndices se muestra el comportamiento de las temperaturas, donde podemos apreciar que el incremento de temperatura de los cuerpos con mayor densidad (la bandeja o el agua depositada dentro de la misma) alcanzan el punto máximo con una pequeña demora con respecto a los cuerpos con menor densidad (el aire de los ambientes internos), pero son capaces de retener el calor absorbido por un mayor tiempo lo que permite que la planta siga operando aun después de haberse ocultado el sol, esto se aprecia en la pendiente de enfriamiento de los cuerpos mas densos contra los cuerpos menos densos. Lo antes expuesto puede entenderse debido a que el producto ρC_p (Capacidad térmica volumétrica) que mide la capacidad de un material para almacenar energía térmica es mayor en las sustancias de densidad grande que en las sustancias de densidad pequeña aun cuando el calor específico de las sustancias de densidad grande es menor que el de las sustancia menos densas. No existen registros de temperatura de agua destilada a ciertas horas del día debido a que el flujo no era constante, o sea, este era muy pequeño para ser medido.

El modelo no destila hasta que el agua en la bandeja se halla calentado lo suficiente como para llevar a cabo el proceso, se nota que este punto es alcanzado poco antes de que los ambientes hallan logrado alcanzar su punto máximo, lo cual nos indica que este punto máximo de los ambientes es alcanzado gracias al incremento de la vaporización del agua, entre otros factores. La planta no deja de operar (momento en que se detiene la destilación) para cuando se alcanza el rango de temperatura en la que empezó a destilar, sino que continúa destilando por un período de tiempo adicional, esto es por el retardo en la disminución de la temperatura en el agua depositada en la bandeja y el vapor restante en los ambientes que termina condensándose pasado un período de tiempo.

En las graficas presentadas en los anexos podemos apreciar que hay una relación directa entre las pendientes de T1, T2, T3 y T5; esto nos indica que la velocidad de calentamiento y enfriamiento de los ambientes 1 y 2, el agua almacenada en la bandeja y la

bandeja, es muy parecida. Aun así la velocidad de enfriamiento de los ambientes es ligeramente mayor que la de la bandeja o el agua.

También se puede notar el llamado efecto invernadero, por que se aprecia en la grafica el gran incremento de las temperaturas internas del sistema con respecto a una temperatura ambiental que tiene un comportamiento constante.

Las pequeñas variaciones como lo son el paso de una nube que proyecta una sombra o una pequeña llovizna, lo cual disminuye la irradiación directa, causa un efecto notable sobre las temperaturas de los ambientes internos, mas las temperaturas de la bandeja y el agua depositada en la misma conservan su comportamiento.

A diferencia de la radiación solar, la humedad relativa en el medio ambiente (exterior) no afecta de manera notable al sistema. Las variaciones de humedad a lo largo del día son justificables por los cambios climatológicos ocurridos, como son las lluvias y pequeñas lloviznas que a su vez acarrear nubosidad.

La temperatura del agua depositada en la bandeja y la temperatura de la bandeja se mantienen casi iguales a lo largo del día manteniendo un comportamiento casi idéntico, la única diferencia es que la temperatura del agua es ligeramente mayor.

Las temperaturas registradas en el ambiente 1 son mayores, en todo momento que las del ambiente 2, esto justifica la diferencia de temperaturas medidas en las salidas de agua destilada, esto es, la temperatura de destilado de la primera etapa es mayor que la temperatura de destilado de la segunda etapa.

En la gráfica 4 del apéndice se puede apreciar que todas las curvas de temperatura registradas a lo largo de los días de prueba pueden promediarse y aproximarse a curvas de tendencia polinomial de segundo grado.

Estos análisis reflejan el comportamiento de nuestro modelo, para las condiciones ambientales y geográficas dadas, por lo tanto los valores de producción de agua obtenida no son determinantes para una planta de este tipo debido a que la producción varía como consecuencia de los cambios climatológicos y geográficos, por lo que los valores de optimización son valores experimentales que deben ser determinados para las condiciones en las que se opera la planta y que varían dependiendo de la ubicación geográfica, época del año, etc.

En cuanto al análisis físico-químico del agua destilada podemos apreciar que existe olor y sabor a plástico, esto es debido a que al empezar a operar la planta por primera vez el contacto del agua con los elementos produce reacciones, pero aproximadamente a una semana de operación este sabor y olor deberían de desaparecer (ver capítulo II) debido a que los componentes ya estarán “curados”.

Al comparar los resultados arrojados por el análisis del agua destilada con los estándares americanos (véase capítulo I) podemos comprobar que el agua producida cumple los requisitos para ser considerada agua de consumo humano (potable).

**CAPÍTULO VII
CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES**

CONCLUSIONES.

- La desalinización solar es de fácil manejo, requiere una pequeña inversión de capital, y permite que las operaciones de construcción, operación, reparación y mantenimiento se puedan ejecutar por personas que solo requerirán de una instrucción básica.
- El sistema desarrollado es factible desde el punto de vista técnico ya que la producción de agua destilada promedio del modelo fue de 6,337 Lts/m²Día lo cual supera el promedio de producción de 5Lts/m²Día reportado para plantas de este tipo en la literatura.
- El modelo es de bajo impacto ambiental.
- Se logró aprovechar satisfactoriamente el recurso de energía solar para la desalinización de agua de mar.
- Las pequeñas variaciones del climatológicas no influyen severamente en el desempeño del modelo, siempre y cuando estas no ocurran cercanas al medio día solar que es cuando se alcanzan los mayores niveles de temperatura.
- El costo del agua producida por el modelo esta supeditado a la inversión inicial, ya que esta inversión representa el mayor porcentaje del costo total, mientras que los costos de mantenimiento y operación son relativamente bajos y su aporte al costo total es mínimo.
- El agua destilada en el modelo es potable, dentro de las especificaciones americanas (E.P.A.) y de la O.M.S.

RECOMENDACIONES.

- Se recomienda no utilizar para consumo humano el agua destilada en las primeras dos semanas de funcionamiento.
- Se debe tomar en cuenta al elegir la pintura de fondo de la bandeja, aparte de las condiciones que debe soportar, que la misma no debe contaminar el agua; este es uno de los puntos donde la calidad debe prevalecer sobre el costo. Se recomienda el uso de pintura con base epóxica y de vehículo aductoamina.
- Se puede aumentar la eficiencia del destilador si el agua de alimentación es precalentada.
- Es recomendable hacer atravesar el agua de alimentación de la segunda etapa y el agua de la bandeja por un filtro antes de ser introducida al sistema, de esta manera se evitara la entrada al sistema de algas, pequeños animales, arena, etc. dando como resultado un mayor intervalo de tiempo para el mantenimiento.
- La segunda etapa no debe ser puesta en funcionamiento antes de que la primera etapa halla iniciado el proceso de destilación.
- Después de finalizado el día de operación la salmuera debe ser extraída del destilador. Al siguiente día esta debe de ser repuesta.
- La energía solar puede ser mayormente aprovechada si se estudian las posibilidades extras que una planta como esta puede tener, como la variante con aprovechamiento de la salmuera para la obtención de sal.
- Se recomienda un análisis mas riguroso, estudiando el comportamiento del modelo a lo largo de al menos 1 año de servicio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS

1. ABUALHAMAYEL H. I., GANDHIDASAN, P., “ A simple análisis of solar desalinización of seawater”, Desalinization n°99, Amsterdan, 1994, pp. 137-147.
2. AMERICAN WATER WORKS ASOCIATION, “Water quality”, 2da. edición., Denver, 1995, pp. 10-15.
3. ARBOLEDA VALENCIA Jorge, “Teoría y práctica de la purificación del agua”, Acodal, Colombia, 1992, pp. VI-XI.
4. BELESSIOTIS V., DELYANNIS E., VOROPOULOS K., “Experimental and Theoretical method for the determination of the daily output of a solar still: input-output method” Desalinization n°100, Amsterdan, 1995, pp. 99-104.
5. BRESLIN W. R., “Solar Still”, Vita, Virginia, 1980.
6. BRINKWORTH B. J., “Energía solar para el hombre”, Ediciones Blume, Madrid, 1981.
7. CHAIBI M. T., “An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas”, Desalinization n°127, Amsterdan, 2000, pp. 119-133.
8. DOYLE Laurence, otros autores, “Materiales y procesos de manufactura para ingenieros”, Prentice Hall, 3° edición, México, 1988, pp. 233-271
9. FARRINGTON DANIELS, “Uso directo de la energía solar”, Ediciones Blume, Madrid, 1977.
10. GORDES Joel, McCracken Horace, “Understanding solar stills”, Vita, Virginia, 1985.
11. HOLMAN J. P., “Transferencia de calor”, McGraw Hill, 8° edición, Madrid, 1998.
12. INCROPERA Frank y DeWITT David, “Fundamentos de transferencia de calor”, Prentice hall, 4° edición, México, 1999.
13. KREIDER Jan F., “Solar heating and cooling”, Mc Graw Hill, 2da. edición, 1982.
14. KREIDER Jan F y KREITH F., “Principles of solar engieneering”. Hemisphere. Washington d.c. 1978.
15. NACIONES UNIDAS, “Solar destillation”, Naciones Unidas, New York, 1970.

16. NACIONES UNIDAS, “Diseño de sistemas de suministro de agua basados en la desalación”, Naciones Unidas, New York, 1969.
17. NACIONES UNIDAS, “Desalinización de agua”, Naciones Unidas, New York, 1965.
18. O’CONNOR Daniel, “101 Patented solar energy uses”, New York, 1981.
19. PERAZA Celestino y CARABALLO Edgar, “Potabilización del agua de mar utilizando energía solar”, U.C.V., Caracas, 1962.
20. PRIETO Oscar, “Desalinización de agua de mar con energía solar”, U.C., Valencia, 1981
21. ROHSENOW W. M., “Handbook of heat transfer”, Mc Graw Hill, New York, 1973, Capítulo 12.
22. TANAKA H, NAGATA T., NOSOKO T., “ A highly productive basin-type-multiple-effect coupled solar still”, Desalination n°130, Amsterdam, 2000, pp. 279-293.
23. TIWARI G. N., MUKHERJEE K., ASHOK KR, YADAV Y.P., “Comparision of various designs of solar stills”, Desaliniaztion n°60, Amsterdam, 1986, pp. 191-202.
24. TIWARI, G. N., “Feasibility study of solar distillation plants in south pacific countries”, Desalination n°82, Amsterdam, 1991, pp. 233-241.
25. U.C.V., “Recursos hídricos en venezuela”, Comisión de estudios interdisciplinarios, Caracas, 1999, pp. 97-99.
26. VAN WYLEN Gordon, SONNTAG Richard y BORGNAKKE Claus, “Fundamental of thermodynamics”, John Wiley and sons, 5° edición, New York, 1998.

ENTREVISTA PERSONAL

27. ESPARRAGOZA León

EXPOSICIONES

28. “El Agua en nuestras vidas”, Biblioteca Nacional y Fundación Polar , Junio 2001 Sala de exposiciones Biblioteca Nacional

PÁGINAS WEB

www.Ch2mhill.org “ABC’s of desalting”, 04/2001

www.usbr.gov “ U.S. Bureau of reclamation”, 04/2001

www.edsoc.com “European desalination society”,04/2001

www.ce.vt.edu “Saltwater desalination”,04/2001

www.hawaii.edu “World wide water” ; “Sea water desalination in California”; “U.S. Water News”; “International desalination association”,04/2001

APÉNDICE

Tabla 1 Patrones físico-químicos de potabilidad.

Parámetros	OMS	CEE	EPA	Produce
Turbiedad	< 1.0 Unt.	0 – 1 Unt.	0.5 Unt. 95% del tiempo para agua filtrada. Filtro lento 1 – 5 Unt. 95% del tiempo	Interfiere con la desinfección.
Color verdadero OC	15	1	5	Con el cloro crea Trihalometanos.
Olor	0	0	Inofensivo	Molesta al consumidor.
Sabor	0	0	Inofensivo	Molesta al consumidor.
Aluminio (mg/L)	0.2	0.05	0.1	Interfiere la diálisis de paciente de riñón.
Antimonio (mg/L)	-	-	0.006	Altera el colesterol y niveles de glucosa.
Asbesto	-	-	7 millones de fibra por litro	Tumores benignos.
Arsénico (mg/L)	0.05	0.05	0.05	Cancer en la piel y afecta en los nervios.
Bario (mg/L)	-	0.1	2	Afecta el sistema circulatorio.
Cadmio (mg/L)	0.005	0.005	0.005	Se concentra en el hígado, riñones y páncreas.
Berilio (mg/L)	-	-	0.004	Riesgo cáncer en los huesos y pulmones.
Cromo (mg/L)	0.05	0.005	0.1	Efectos en el hígado y riñones.
Cloruro (mg/L)	250	200	250	Afecta la digestión.
Cianuro	0.1	0.05	0.2	Efectos en el baso, hígado y riñones.
Fluoruros (mg/L)	1.5	0.7 – 1.5	2	Daños de los dientes y los huesos.
Fenol (mg/L)	0.01	-	0.001	Interfiere cloración
Mercurio (mg/L)	0.001	0.001	0.002	Daño en sistema nervioso.
Hierro (mg/L)	0.3	0.05	0.3	Agua roja.
Magnesio (mg/L)	-	30	-	Enfermedades cardíacas.
Manganeso (mg/L)	0.1	0.02	0.05	Agua roja.

Níquel (mg/L)	-	0.05	0.1	Sensibiliza piel y sistema nervioso.
Nitratos (mg/L)	-	2.5	10	Disminuye la oxigenación de la sangre en niños (Metemoglobinemia)
Nitritos (mg/L)	-	-	1	
Nitritos y Nitratos totales (mg/L)	10	-	10	
Selenio (mg/L)	0.01	-	0.05	Ataca al sistema nervioso
Sulfatos (mg/L)	400	25	250	Daños estomacales.
Talio (mg/L)	-	-	0.002	Ataque al hígado, riñón, Intestinos y cerebro.
Plomo (mg/L)	0.05	0.05	< 0.05	Daña el sistema nervioso y los riñones, tóxico para los niños.
Cobre (mg/L)	1.0	0.1	< 1.0	
Sodio (mg/L)	200	20	-	Afecta la presión sanguínea.
Zinc (mg/L)	5.0	0.1	5.0	-

Tabla 2 Comparación entre algunos materiales usados para la construcción de la cubierta.

Material	Peso(Kg/m ²)	Vida útil	Temperatura máxima (°C)	Transmisividad solar (%)	Transmisividad de luz infrarroja (%)	Resistencia al impacto	Habilidad para formar capas de agua
Vidrio templado con bajo contenido de hierro	7.8 a 12.2	>50 años	204-316	91	< 2	Baja	Excelente
Vidrio ordinario para ventanas	6	50 años	204	86	2	Baja	Excelente
Tedlar	0.14	5 a 10 años	107	90	58	Baja	Aceptable
Acrílico	3.8	>25 años	93	89	6	Media	Aceptable
Poli carbonados	3.8	10-15 años	127	86	6	Alta	Aceptable
Acetato	1.8	10 años	82	90	?	Media	Aceptable
Fibra de vidrio	1.22	8 a 12 años	93	72-87	2 – 12	Media	Aceptable
Polietileno	0.14	8 meses	71	90	80	Baja	Mediocre

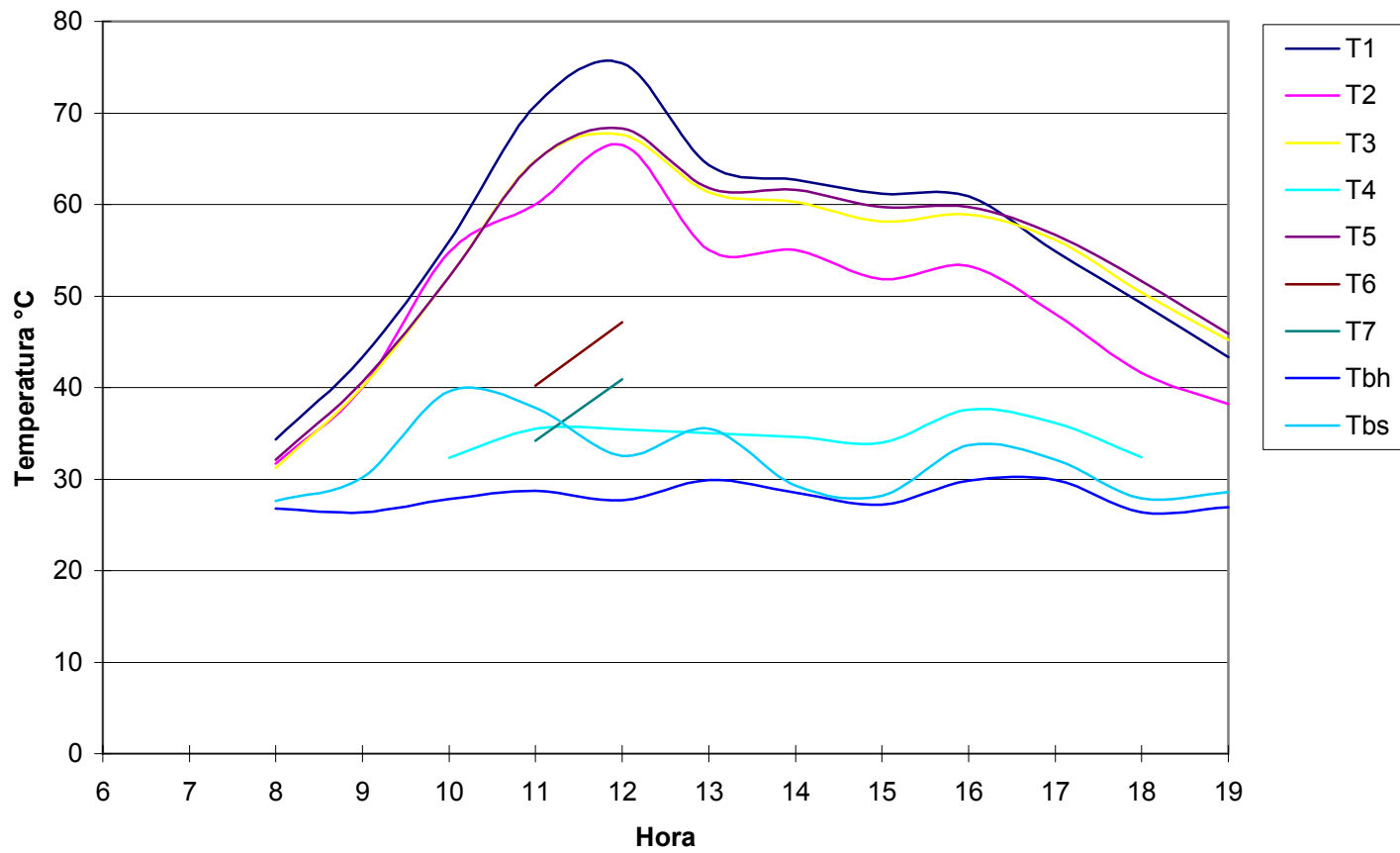
Tabla 3 Comparación entre algunos materiales usados para la construcción de la bandeja.

Material	Durabilidad	Costo	Habilidad para trabajarlo	Facilidad de limpieza	Transportabilidad	Toxicidad
Acero esmaltado	Alta	Alto	Baja	Alta	Media	Baja
Caucho EPDM	Alta	Alto	Baja	Alta	Alta	Baja
Caucho	Alta	Alto	Baja	Alta	Alta	Baja
Asfalto	Alta	Medio	Media	Media	Media	Condición local
Asbesto	Alta	Medio	Media	Media	Media	Alta
Polietileno	Media	Condición local	Baja	Media	Alta	Baja
Manto asfáltico en cemento	Media	Medio	Condición local	Media	Baja	Condición local
Madera	Baja	Bajo	Media	Media	Media	Baja
Fiberglass	Media	Bajo	Baja	Alta	Media	Baja

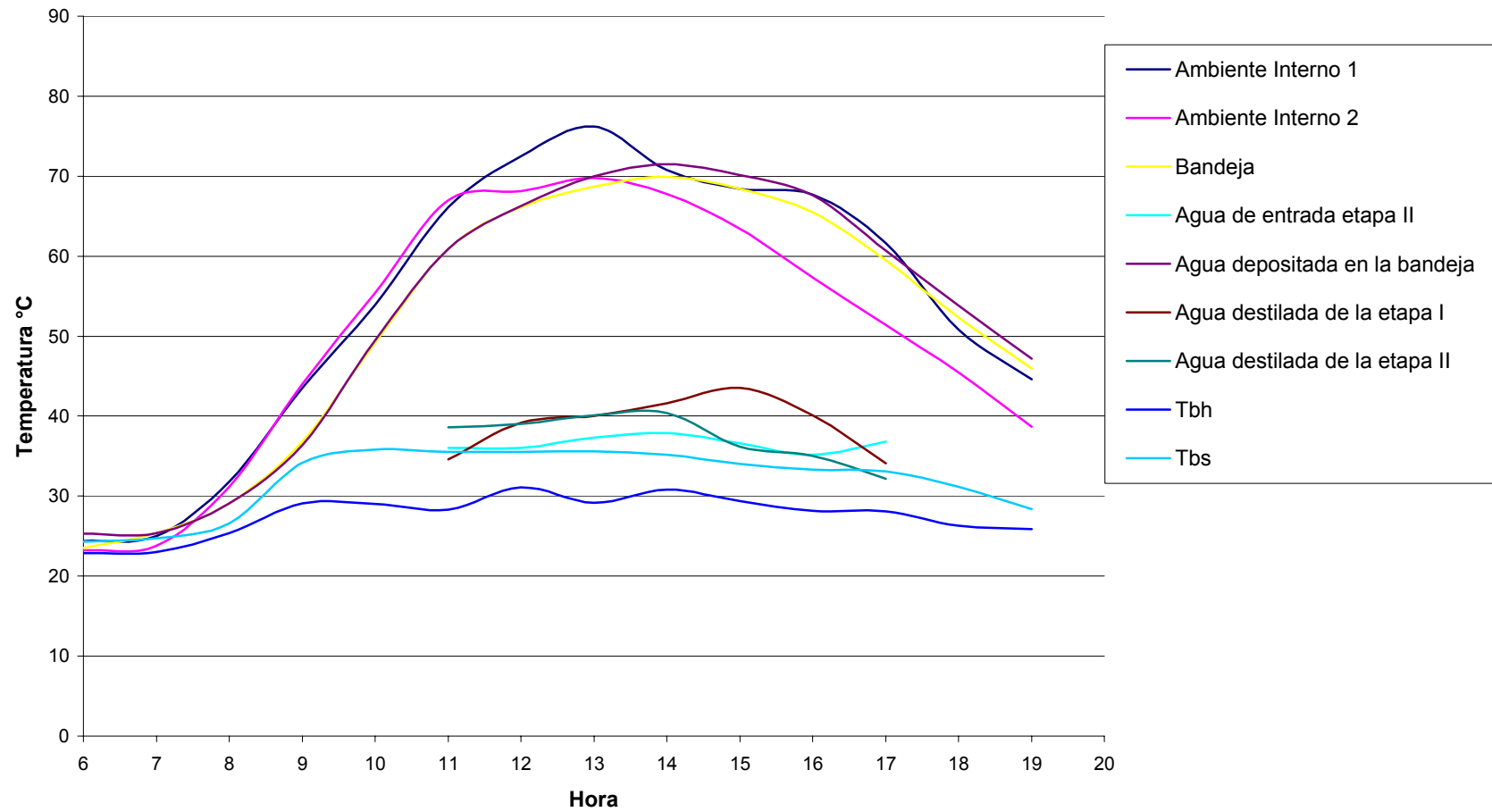
Tabla 4 Propiedades de algunos materiales plásticos.

Materiales	Marcas	Máximo servicio (°C)	Propiedades importantes
Acrílicos: etil y metilmetacrilato	Acrilita, Perpex, Plexiglas	60-110	Resistencia moderada, suavidad, baja resistencia al calor, buena óptica.
Polycarbonato	Lexan, Merlon	120	Alta resistencia mecánica, ductilidad, rigidez y transparencia.
Poliésteres, Politerezталatos	Celanex, Tenita, Valox	110	Buena resistencia química, al agua, abrasión tenacidad.
Polietilenos	Alathone, Etilux, Polithene	90	Buena resistencia química y a la humedad; plástico de mas uso; flexible y rígido.
Polipropilenos	Escon, Propilux, Tenita	120	Resistencia química y humedad; grados especiales para resistencia al impacto y servicio a temperaturas altas.
Poliestirenos	Cerz, Loralin, Lustrón	60-80	Buena resistencia eléctrica y al manchado
Vinilos: PVC, Acetatos, etc.	Chemaco, Elbanol, Saran.	60-105	Muy flexible hasta rígido, buena resistencia a la flama, química y a la intemperie en varios grados.
Etileno propileno (EPM, EPDM)	?	?	Buenas propiedades mecánicas cuando se le refuerza, excepcional para resistir la luz solar, oxígeno y ozono; buenas propiedades de temperatura; bueno en aislamientos.
Neopreno	?	?	Excelente resistencia al ozono, calor, intemperie y flama; buena resistencia química.
Hules siliconas	?	315	Alta resistencia al oxígeno, ozono y radiación; baja resistencia mecánica al desgaste, excelente para sellos y aislamientos
Uretano	?	?	Resistencia excepcional a la abrasión; buena resistencia al oxígeno y luz solar; baja resistencia al calor y a la humedad
Epoxis	Durez, Hisol, Polymeric	260	Buenas propiedades mecánicas; estable; resistente al calor y químicos.
Poliésteres	Dracón, Mylar	150	Tenaz, resiste la mayoría de las solventes, ácidos y bases

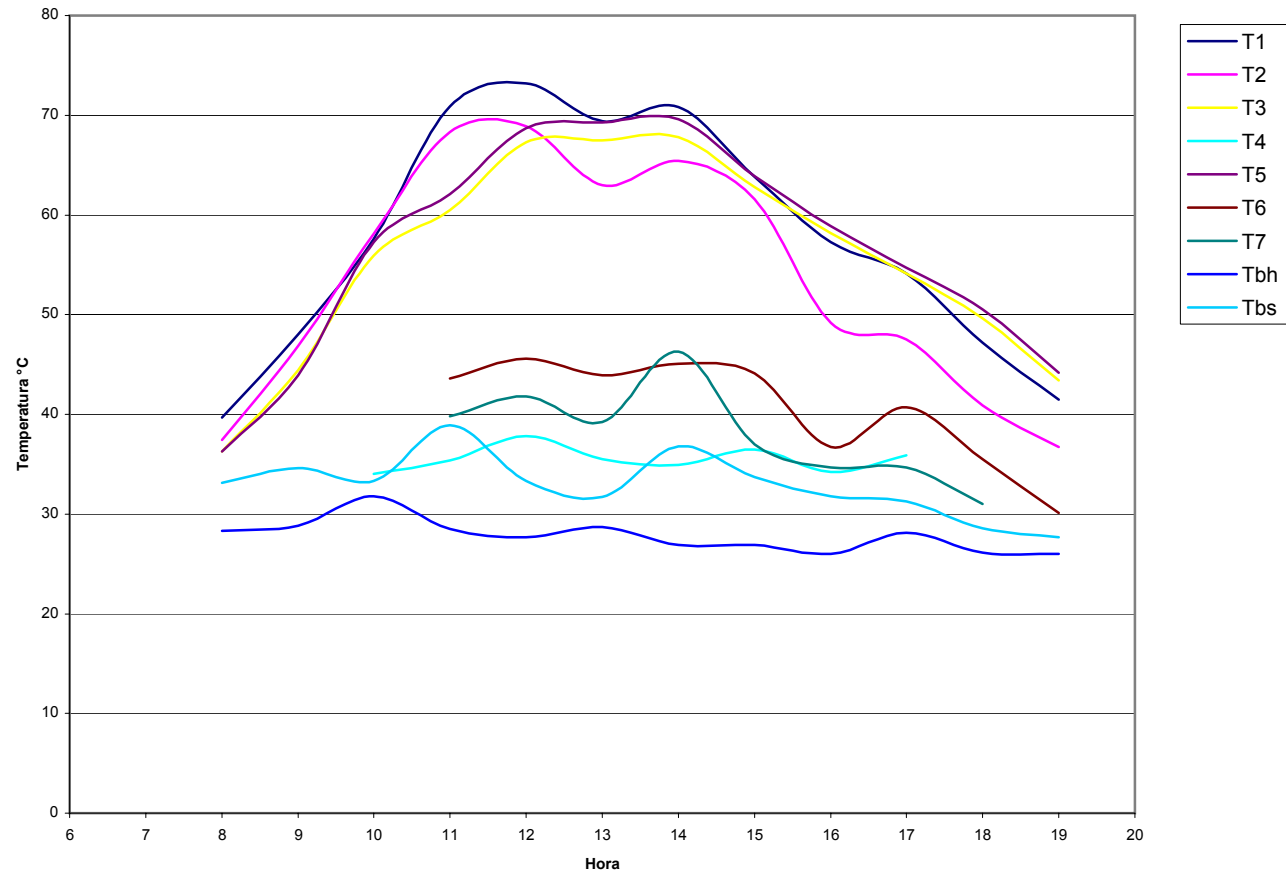
Comporamiento de temperaturas día 2



Comportamiento de temperaturas día 3



Comportamiento de temperaturas día 4



Comportamiento de temperaturas (promedio)

