



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DESARROLLO Y ANÁLISIS ENERGÉTICO DE
DESTILADORES SOLARES DE AGUA CON CONVECCIÓN
NATURAL Y CONVECCIÓN FORZADA**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERÍA EN SISTEMAS – GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

P R E S E N T A :

MARGARITA CASTILLO TÉLLEZ

TUTOR:

M.C. JOSÉ CAMPOS ÁLVAREZ

2008



Centro de Investigación
en Energía



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. JORGE ARTURO HIDALGO TOLEDO

Secretario: DR. AARÓN SÁNCHEZ JUÁREZ

Vocal: M.C. JOSÉ CAMPOS ÁLVAREZ

1^{er.} Suplente: Ph. D. RAÚL SUÁREZ PARRA

2^{do.} Suplente: M. EN C. ALFONSO OLAÍZ Y PÉREZ

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA – UNAM -

TUTOR DE TESIS:

M.C. JOSÉ CAMPOS ÁLVAREZ

FIRMA

DEDICATORIA

A mi esposo, gracias Adrián por tu apoyo sin límites de siempre.
A mis hijos Checo y Monchis, el pensar en ustedes me es suficiente para lograr
cualquier objetivo que me proponga.
A mis Papás, gracias. Ustedes me hicieron perseverante y me enseñaron a soñar con
grandes metas. Ojalá logre la admiración que siento por ustedes de mis hijos.
A mis hermanos, Betty, Ade, Gely y Toto, ¿Qué haría yo sin el apoyo desinteresado
de Ustedes?
A mis ahijados y sobrinos por su calor y por endulzar mis días.

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor de tesis y maestro JC, además de guiarme y enseñarme, siempre ha sido un
gran apoyo para mí, ¡gracias por su paciencia maestro!
A mis Sinodales, gracias por su gran aportación y apoyo para lograr la culminación de
este trabajo.
A mis maestros, por su vocación para la enseñanza.
A la Sra. Marilú Pineda, gracias por su apoyo durante toda la Maestría.

Este trabajo se llevó a cabo por el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y
Tecnología (CONACYT).

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|----------------------|----|
| DEDICATORIA | 3 |
| AGRADECIMIENTOS..... | 3 |
| RESUMEN..... | 9 |
| PREFACIO..... | 10 |

Capítulo Primero. La destilación solar de agua.

| | |
|--|----|
| Objetivo general..... | 11 |
| Objetivos particulares..... | 11 |
| Hipótesis..... | 11 |
| Justificación..... | 12 |
| Generalidades..... | 13 |
| 1.1. Problemática del agua en el mundo..... | 13 |
| 1.1.1 Estadísticas de consumos de agua en el mundo..... | 15 |
| 1.2. Problemática del agua en México..... | 16 |
| 1.3. La urgente necesidad de obtener recursos hídricos de buena calidad, respetando los ecosistemas..... | 20 |
| 1.3.1. Desalación de agua de mar o salobre..... | 21 |
| 1.3.2. Potabilización de aguas residuales industriales..... | 22 |
| 1.4. El uso de la energía como fuente de transformación: ventajas y desventajas de la energía solar..... | 23 |
| 1.5. Panorama general de la destilación en el mundo y en México. Los procesos existentes a la fecha..... | 25 |
| 1.5.1. Situación de la destilación solar en el mundo y en México..... | 25 |
| 1.5.2. Procesos de destilación térmica existentes a la fecha..... | 28 |
| 1.6. Análisis energético de un destilador solar..... | 32 |
| 1.6.1. Procesos Físicos que se producen en un destilador solar..... | 35 |
| 1.6.2. Propiedades de los Materiales utilizados en la fabricación del destilador..... | 40 |
| Metodología..... | 44 |

Capítulo Segundo. Desarrollo experimental.

| | |
|--|----|
| 2.1 Introducción..... | 47 |
| 2.2 Cómo funciona el destilador de caseta de dos vertientes..... | 48 |
| 2.3 Condiciones necesarias para un buen funcionamiento del destilador solar..... | 49 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.4 | Planteamiento de la Figura de Mérito..... | 50 |
| 2.5 | Primer Prototipo..... | 53 |
| 2.5.1 | Secuencia y datos obtenidos en la primera fase. Convección natural..... | 53 |
| 2.5.2 | Secuencia y datos obtenidos en la segunda fase. Convección forzada: un ventilador..... | 56 |
| 2.5.3 | Secuencia y datos obtenidos en la tercera fase. Convección forzada: Un ventilador, un disipador..... | 58 |
| 2.5.4 | Secuencia y datos obtenidos en la cuarta fase. Convección forzada: Un ventilador y pared de lámina de aluminio..... | 60 |
| 2.6 | Conclusiones..... | 63 |

Capítulo Tercero. Resultados obtenidos.

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Introducción..... | 64 |
| 3.2 | El prototipo más eficiente de los cuatro desarrollados..... | 64 |
| 3.3 | La Destilación mediante energía solar es económicamente factible.... | 66 |
| 3.4 | La destilación solar puede ser técnicamente factible en México..... | 68 |
| 3.5 | Obtención de una metodología de correlación..... | 69 |
| | Conclusiones..... | 71 |
| | Recomendaciones..... | 73 |
| | Bibliografía | 74 |
| | Relación de Figuras..... | 7 |
| | Relación de Tablas..... | 8 |

Relación de figuras

Capítulo Primero

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1.1 | Comparativo de precipitación media mensual en diversas ciudades del mundo | 17 |
| Figura 1.2 | Grado de presión sobre el recurso hídrico.... | 18 |
| Figura 1.3 | Distribución porcentual del agua concesionada para usos fuera del cuerpo de agua..... | 19 |
| Figura 1.4 | Contraste Relación disponibilidad-población-PIB | 19 |
| Figura 1.5 | Destiladores solares de caseta en una azotea de La Habana Vieja..... | 26 |
| Figura 1.6 | Uno de los diferentes destiladores solares caseros utilizado en México..... | 27 |
| Figura 1.7 | Desaladora MSF..... | 28 |
| Figura 1.8 | Diagrama de proceso de MED..... | 29 |
| Figura 1.9 | Planta desaladora MED..... | 30 |
| Figura 1.10 | Planta desalinizadora por CV..... | 30 |
| Figura 1.11 | Destilador de poceta..... | 31 |
| Figura 1.12 | Destilador de cascada..... | 32 |
| Figura 1.13 | El espectro solar..... | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 1.14 Distribución de la radiación solar que llega a la superficie terrestre..... | 33 |
| Figura 1.15 Isolíneas de Insolación promedio anual para México..... | 34 |
| Figura 1.16 Diagrama de absorción..... | 39 |
| Figura 1.17 Data Logger. CIE-UNAM..... | 47 |

Capítulo segundo

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Medidas básicas del destilador solar de caseta de dos vertientes utilizadas en los modelos analizados en este trabajo de Tesis..... | 48 |
| Figura 2.2 Destilador solar de caseta de dos vertientes y sus componentes..... | 49 |
| Figura 2.3 Temperatura del exterior del destilador el día 8 de marzo del 2008..... | 51 |
| Figura 2.4 Irradiancia de un día completo, 8 de marzo del 2008..... | 51 |
| Figura 2.5 Temperatura en el interior del vidrio del destilador solar | 52 |
| Figura 2.6 Temperatura del agua dentro del colector, día 8 de marzo del 2008..... | 52 |
| Figura 2.7 Temperatura del aire interior del destilador solar del 8 de marzo del 2008... | 52 |
| Figura 2.8 Destilador solar de caseta de dos vertientes, convección natural | 53 |
| Figura 2.9 Figura de mérito para el destilador solar de convección natural..... | 55 |
| Figura 2.10 Destilador solar convección forzada con un ventilador | 56 |
| Figura 2.11 Figura de mérito para el destilador solar con convección forzada: un ventilador. | 57 |
| Figura 2.12 Destilador solar de agua de convección forzada: Un ventilador y un disipador. | 58 |
| Figura 2.13 Irradiancias obtenidas los días 2, 3 4 y 5 de mayo del 2008..... | 59 |
| Figura 2.14 Figura de mérito para el destilador solar con un ventilador y un disipador.... | 59 |
| Figura 2.15 Destilador solar de agua, convección forzada: Pared metálica y un ventilador | 61 |
| Figura 2.16 Figura de mérito para el cuarto modelo analizado | 62 |

Capítulo Tercero

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 Comparativo de figura de mérito, cuatro modelos analizados..... | 65 |
| Figura 3.2 Comportamiento del destilador solar..... | 66 |

Relación de tablas

Capítulo Primero

| | |
|--|----|
| Tabla 1.1 Recursos hídricos mundiales..... | 13 |
| Tabla 1.2 Recursos de agua dulce en el mundo..... | 14 |
| Tabla 1.3 Clasificación de la disponibilidad natural media del agua..... | 15 |
| Tabla 1.4 Promedios para el País en los que destaca la enorme inequidad en materia de precipitación pluvial media anual para algunas entidades de la República durante el periodo 1941–2005..... | 17 |
| Tabla 1.5 Presión máxima del vapor para diferentes temperaturas..... | 37 |

Capítulo Segundo

Tabla 2.1 Valores obtenidos durante las observaciones diarias y que originan la figura de mérito del destilador solar de convección natural.....55

Tabla 2.2 Valores que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador.....57

Tabla 2.3 Valores obtenidos durante las observaciones diarias que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador y un disipador.....60

Tabla 2.4 Valores obtenidos durante las observaciones diarias y que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador y una pared metálica.....62

Capítulo Tercero

Tabla 3.1 Resumen de resultados globales obtenidos.....64

Tabla 3.2 Valores que originan la gráfica comparativa de la figura de mérito de cada modelo analizado.....65

Tabla 3.3 Costos de materiales utilizados para la fabricación del destilador solar.....66

Tabla 3.4 Resumen de costos para las plantas desaladoras.....68

Tabla 3.5 Tamaño requerido en un destilador solar con características del tercer modelo analizado.....69

Tabla 3.6 Costo de destiladores en función del área requerida.....70

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad, primero, proporcionar un panorama general sobre la situación actual del agua y el estado del arte de la destilación solar en México y en el mundo, así como una visión ordenada de los principales tópicos relacionados con estos temas, con la finalidad de resaltar la importancia de obtener agua dulce para consumo humano mediante la llamada actualmente, tecnología verde.

Se describe el desarrollo y caracterización de cuatro prototipos de destiladores solares. Se definió la figura de mérito del destilador como el número de litros producidos por unidad de energía solar captada y por unidad de área con el objeto de caracterizarlos y tener una herramienta de dimensionamiento que permita diseñar a futuro escalamientos de los prototipos propuestos.

Los diferentes temas han sido desarrollados partiendo de los fundamentos de la Gestión Integrada del Agua, hacia la discusión de los problemas fundamentales y los diferentes métodos de solución de los mismos, es decir, frente a las crecientes demandas de agua de las poblaciones, debemos exigir proyectos que conjuguen los enfoques económicos, sociales, técnicos y ambientales para lograr resolver la problemática actual.

Se proporciona una herramienta que ayude a resolver los problemas de escasez de agua, sobretudo en poblaciones rurales y/o costeras, la sobreexplotación de las fuentes naturales de agua dulce con las que todavía contamos y aminorar el daño que se está causando al medio ambiente.

Este trabajo está orientado a abastecer a poblaciones rurales o urbanas con un suministro de agua purificada para satisfacer sus necesidades de ingesta de agua, y, a su vez, en base al marco mencionado, colaborar en una gestión integrada de los recursos naturales, basado en el equilibrio de los elementos que componen la sustentabilidad: ambiental, económico y social, para contribuir con el desarrollo de nuestro País.

Los resultados demostraron que la convección forzada, lograda con ventilador y disipador de calor de aluminio mejora la cantidad de agua destilada en un destilador tipo caseta de doble caída y que éste, es un modelo viable económica, tecnológica y ambientalmente.

Este sistema de destilación solar propuesto puede resolver los problemas de agua potable en poblaciones marginadas a las que el diseño va dirigido, donde hay mínimas posibilidades de establecer cualquier tipo de infraestructura para potabilización y tratamiento de agua. Estos destiladores proporcionan una solución inmediata, barata y sencilla para la obtención de agua purificada para el consumo humano, lo que traerá beneficios inmediatos a los usuarios al evitarles problemas de salud ocasionados por el uso e ingesta de agua contaminada, contribuyendo a que la población logre beneficiarse con una vida más sana.

Prefacio

Actualmente, las necesidades de agua y energía crecen rápidamente no sólo en nuestro país, sino en todo el mundo, lo cual ha fomentado e impulsado a la realización de todo tipo de proyectos dirigidos a satisfacer estos requerimientos, en los que, el abastecimiento sustentable de agua es la clave para obtener altos rendimientos, sobretodo en regiones áridas, costeras o en las zonas conurbadas de las grandes ciudades; al mismo tiempo, es necesario ofrecer proyectos que colaboren y ofrezcan protección para los ecosistemas.

Pese a que cada vez más gobiernos se están preocupando y han logrado identificar y evaluar en gran medida los efectos del desarrollo sobre el medio ambiente, siguen implementándose proyectos que continúan deteriorándolo cada vez más (como las grandes plantas desaladoras, por ejemplo), ésto debido a que desde su formulación, dichos proyectos no tienen contemplado este punto, o bien porque en muchos casos, económicamente hay que tomar decisiones que afecten el crecimiento de las compañías.

El presente trabajo está dividido en tres capítulos. En el primer capítulo se describe el panorama general y particular de la situación del agua en México y en el mundo así como la urgente necesidad de tomar acciones inmediatas para resolver dicha situación.

En el segundo capítulo se describe el desarrollo y caracterización de cuatro prototipos de destiladores solares de tipo caseta de doble caída: el primero está basado en diseños tradicionales, el segundo se construyó añadiéndole a éste un ventilador de 2.6 W para forzar el arrastre del vapor, el tercero se le añadió un dissipador de calor de aluminio en la pared contraria al ventilador, para aumentar la condensación de vapor y en el cuarto se utilizó una pared metálica de aluminio también para eficientar el proceso de condensación. Los destiladores tienen un área de 0.23 metros cuadrados. Se muestran además figuras típicas de algunos parámetros de funcionamiento como temperatura del agua, irradiancia y temperatura del vidrio, en función del tiempo para un día soleado y se define una figura de mérito para caracterizar cada uno de ellos, como el número de litros producidos por unidad de energía suministrada y por unidad de área.

En el capítulo tercero, se definió una gráfica comparativa de la figura de mérito de cada uno de los prototipos analizados; adicionalmente, se llega a una correlación entre el tamaño requerido en un destilador solar con características del modelo seleccionado en función de la relación de insolación contra volúmenes de agua requerida, así como el costo de destiladores en función del área demandada.

Las conclusiones y recomendaciones, contenidas al final del documento, se espera que sean útiles para introducir consideraciones técnicas y ambientales a los investigadores y estudiantes interesados en el tema y contribuyan en futuros estudios para el desarrollo de este tipo de proyectos.

Margarita Castillo Téllez
Junio del 2008

CAPÍTULO PRIMERO

Objetivo General

Realizar un análisis energético sobre el uso de la destilación solar, como un proceso eficiente, costeable y ecológicamente amigable, en la purificación de agua de mar, agua salobre y agua residual.

Objetivos Particulares

- I. Conocer el estado del arte de la destilación solar en México y en el mundo.
- II. Desarrollar una metodología para dimensionar destiladores solares dependiendo de una aplicación específica.
- III. Determinar la factibilidad técnica y económica de la aplicación de este proceso en México.

Hipótesis

La destilación de agua de mar, salobre y residual industrial mediante energía solar es factible en México, técnica y económicamente.

Mediante la realización de un análisis energético de cuatro sistemas diferentes de destilación de agua por medio de energía solar, se pretende identificar cual es el más eficiente en términos de obtención de agua producto, se obtendrá una figura de mérito de cada sistema y se realizará una gráfica comparativa de los mismos, definida por $l/(kW-h)$, en la que la eficiencia está dada en función de los litros de agua destilada dividida por la energía recibida y considerando el área del destilador.

Asimismo, la eficiencia de cada sistema analizado considerará los costos de adquisición de materiales, ensamble, mantenimiento y ahorros económicos inherentes, considerando la cantidad de agua producto de acuerdo con las condiciones climáticas y el costo del agua en garrafón en las diferentes regiones de México.

Se reafirmará el impacto negativo en los diferentes ecosistemas al no utilizar tecnologías adecuadas como las que tienen grandes consumos de energía, sistemas tecnológicamente más costosos, requieren personal más especializado y sobretodo ocasionan una fuerte contaminación al medio ambiente. A lo que se hace referencia, es que no sólo se tienen que satisfacer las necesidades en cuanto a volúmenes de agua que se requieren, sino que los gobiernos y la comunidad perciban que es una relación de ganar-ganar en la que quede claramente establecido que no vamos a resolver un problema creando otro.

Justificación

Para justificar el desarrollo del presente trabajo, es necesario partir de las siguientes premisas:

1. Menos del 1% del agua en nuestro planeta es dulce, el resto es agua de mar.
2. La distribución del agua es sumamente irregular, especialmente en nuestro país.
3. No podemos resolver un problema generando otro, es decir, no podemos pensar en potabilizar el agua por métodos que dañen el ecosistema, que son ineficientes y consumen grandes cantidades de energía.
4. El Sol es una fuente inagotable de energía y al día de hoy ya contamos con la tecnología para utilizar estas bondades.
5. Existe una gran necesidad en nuestro país de desarrollar alternativas para la potabilización del agua, especialmente de la desalación, pero estas deben ser económicamente viables, sencillas y de beneficio común.

Partiendo de las premisas anteriores, es muy sencillo justificar el por qué del desarrollo de la presente tesis. Se requiere investigar nuevas alternativas para la desalación y/o potabilización del agua; se requiere la aplicación de análisis serios y profesionales para encontrar fuentes de energía renovables y que mejor, que el uso de la energía solar.

Las enormes reservas de agua del mar y aguas salobres y las dificultades en muchos países ante la escasez de agua dulce, han obligado a tomar en consideración las posibilidades de su tratamiento económico y actualmente existe una corriente de interés en la realización de programas de estudio relativos a los distintos métodos tanto de desalación como de potabilización de agua contaminada.

En cuanto al proceso de desalación de agua, éste no solo representa un reto por los procesos tecnológicos que implica sino además por la necesidad de hacerlo económico; al observar el alto consumo de energía para producir un metro cúbico de agua potable, se ve la importancia que tiene este parámetro y porque resulta fundamental.

Por otro lado, si se considera la trascendencia que tendría el hecho de que las industrias logran descontaminar el agua residual que generan y lograr así obtener agua de buena calidad para su propio uso a un menor costo del actual, una buena parte de sus egresos se transformarían en ahorros.

El uso de la energía solar, como forma de obtener energía para la transformación en diferentes procesos es cada día más común, no solo por que el uso de otro tipo de combustibles resulta caro y con altas emisiones contaminantes, sino por que día con día se encuentran formas más eficientes de manejar la energía solar.

Los prototipos de destiladores solares analizados consideran la irradiancia externa, la irradiancia interna, temperatura interna, temperatura externa y volumen de agua entregado.

Generalidades

Tanto los seres humanos como todos los organismos somos absolutamente dependientes del agua, la necesidad de ésta en cantidad suficiente y calidad adecuada, ha servido siempre al hombre para escoger el lugar de su asentamiento.

Se puede afirmar que en la actualidad no existe ninguna actividad humana que no tenga ninguna relación con el agua.

El agua es definitivamente indispensable, no se conoce ningún sustituto cercano y no existen ni organismos, ni ninguna forma de vida que no dependan de ésta. Es entonces indispensable también, necesario e inaplazable el hecho de que se deben buscar nuevas alternativas ecológica y económicamente viables, que no continúen trastornando y deteriorando el medio ambiente y que colaboren a una mejor gestión del agua.

1.1 Problemática del agua en el mundo.

Se estima que en el mundo existen unos 1,400 millones de km³ de agua, de los cuales 35 millones (2.5%) son de agua dulce [I]. La gran cantidad de agua dulce de las capas polares, glaciares y acuíferos profundos no es utilizable. El agua dulce que puede ser usada procede esencialmente del escurrimiento superficial del agua de lluvia, generada en el ciclo hidrológico, ver Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Recursos hídricos mundiales.

| Tipo de agua | Volumen de agua (millones de km ³) | Porcentaje de agua dulce | Porcentaje del total de agua |
|----------------------------------|--|--------------------------|------------------------------|
| Agua total | 1 386 | | 100.00 |
| Agua dulce | 35 | 100.0 | 2.53 |
| Glaciares y capas polares | 24,4 | 69.7 | 1.76 |
| Agua subterránea | 10,5 | 30.0 | 0.76 |
| Lagos, ríos, atmósfera | 0,1 | 0.3 | 0.01 |
| Agua salina | 1 351 | | 97.47 |

Fuente: *Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, 2002. [I]

El promedio anual de precipitación sobre la tierra alcanza 119,000 km³, de los cuales alrededor de 74,000 km³ se evaporan a la atmósfera. Los 45,000 km³ restantes fluyen hacia lagos, embalses y cursos de agua o se infiltran en el suelo alimentando a los acuíferos. Este volumen de agua se denomina convencionalmente «recursos hídricos». [I].

No todos estos recursos son utilizables, porque parte del agua fluye hacia ríos remotos y parte durante inundaciones periódicas. Se estima que de 9,000 a 14,000 km³ son económicamente utilizables por el hombre, nada en comparación con la cantidad total de agua de la tierra.

Cerca del 75% de la población mundial se encuentra concentrada en países y regiones donde sólo existe el 20% de las disponibilidades de agua. Debido al deterioro rápido y acelerado de la vida acuática mundial, esta situación definitivamente va a agravarse a corto plazo [II].

Las áreas con más problemas de escasez de agua y estrés hídrico (cuando el consumo de agua representa más del 10% del agua renovable) son África y Oriente Medio. No obstante, el agua representa también un problema para muchas otras áreas de gran crecimiento socioeconómico e industrial como la India, China o Indonesia.

Mientras hay zonas, como América del Sur, que disponen del 26% de los recursos hídricos del planeta para un 6% de la población (sólo en la cuenca del Amazonas se concentran el 15% de todas las existencias mundiales de agua), Asia, que concentra el 60% de la población mundial, sólo cuenta con el 36% del agua dulce disponible (FAO, 2007).

Las condiciones pueden llegar a empeorar en los próximos 50 años, en la medida que aumente la población y que el cambio climático global altere los regímenes de precipitaciones, en el 2003, el informe de Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el planeta estimó que para los años 2020/25/30 sobre una población, para ese entonces, de 8,000 millones de personas (hoy somos 6,500 millones), 7,000 millones de niños, mujeres y hombres no van a tener acceso al agua potable; tendrán que beber agua contaminada o morirán de sed.

En la actualidad, 550 millones de personas viven en países con escasez y estrés hídrico y se calcula que en el año 2010 serán 1,000 millones. Ver tabla 1.2.

Tabla 1.2 Recursos de agua dulce en el mundo.

| REGIÓN | METROS CÚBICOS ANUALES (PROMEDIO PER CÁPITA) |
|-------------------------------|---|
| Oceanía | 53 711 |
| Sudamérica | 36 988 |
| África Central | 20 889 |
| América del Norte | 16 801 |
| Europa del Este | 14 818 |
| Europa Occidental | 1 771 |
| Asia Central y del Sur | 1 465 |
| África del Sur | 1 289 |
| África del Norte | 495 |

Fuente: *United Nations Environment Programme 2002*

En el nuevo informe presentado este año del IV Foro Mundial del Agua por Naciones Unidas (complementario al del 2003), el organismo no sólo ratifica estas cifras sino que advierte que el 20% de los recursos hídricos del planeta está gravemente afectado por el cambio climático.

1.1.1 Estadísticas de consumos de agua en el mundo.

Aproximadamente el 16% de los países cuentan con una dotación menor a los 1,000 m³ por habitante al año, cifra considerada como crítica en cuanto a oferta del recurso se refiere. Ver Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Clasificación de la disponibilidad natural media del agua.

| Disponibilidad media per-cápita m ³ /hab/año | Clasificación | Total de países en el mundo (%) |
|---|---------------|---------------------------------|
| Menor a 1,000 | Muy baja | 16 |
| 1,001 -5,000 | Baja | 35 |
| 5,000-10,000 | Media | 14 |
| Más de 10,000 | Alta | 35 |

Fuente: Fernández A. enero-marzo, 2001. *Conservación del agua: única alternativa para el futuro*. *Tláloc*, No. 21, p.2 [III].

A nivel mundial el sector agrícola es el mayor consumidor de agua, es responsable del consumo de aproximadamente el 70% del agua y hasta el 90% en las regiones áridas, por ejemplo, las naciones con lluvias frecuentes, que favorecen una buena producción agrícola, no necesitan irrigación mientras que otras, en zonas áridas o con distribución desigual del agua y lluvia, requieren enormes obras de irrigación para conseguir cosechas razonables.

Los consumos de agua para la irrigación han aumentado más de un 60% desde 1960 [I].

La demanda hídrica en una ciudad se puede expresar en litros/habitante/día, este concepto integra tanto al agua usada directamente o indirectamente por el ciudadano promedio como a las fugas que ocurren en la red de suministro. Es un valor muy representativo de las necesidades y/o consumo real de agua dentro de una comunidad o población y, por consiguiente, refleja también de manera indirecta su nivel de desarrollo económico y social.

Este indicador social se obtiene a partir del suministro medido por contadores, estudios locales, encuestas o la cantidad total suministrada a una comunidad dividida por el número de habitantes.

A nivel mundial, se extraen actualmente unos 3,600 km³ de agua dulce para consumo humano, es decir, 1,600 litros/habitante/día, de los cuales, aproximadamente la mitad no se consume (se evapora, infiltra al suelo o vuelve a algún cauce) y, de la otra mitad, se calcula que el 65% se destina a la agricultura, el 25% a la industria y, tan solo el 10% a consumo doméstico.

Al ritmo actual de inversiones, el acceso universal al agua potable no podrá anticiparse razonablemente hasta el año 2050 en África, el 2025 en Asia y el 2040 en América Latina y el Caribe. En general, para estas tres regiones, que comprenden el 82.5% de la

población mundial, el acceso durante los años noventa aumentó de 72 a 78% de la población total, mientras que el saneamiento aumentó de 42 a 52%.

En los países en desarrollo, entre el 90 y el 95% de las aguas residuales y el 70% de los desechos industriales se vierten sin ningún tratamiento en aguas potables que consecuentemente contaminan el suministro del agua utilizable.

Aproximadamente el 94% de la población urbana tuvo acceso al agua potable al final del 2000, mientras que el índice para los habitantes en áreas rurales era solamente del 71%. Para el saneamiento, la diferencia era aún mayor ya que el 85% de la población urbana estaba cubierta, mientras que en las áreas rurales, solamente el 36% de la población tuvo saneamiento adecuado [IV, V].

1.2 Problemática del agua en México.

En México, adolecemos de grandes problemas relacionados con el agua, se puede mencionar, entre ellos, la carencia de infraestructura y de capital para conservar la ya implementada.

La contaminación en nuestros cuerpos de agua es alarmante y se agrava este problema, igual que el anterior, por la falta de financiamiento.

Por otra parte no se puede brindar el mismo acceso de agua a las poblaciones rurales que a las urbanas; además, la población en general tiene muy poca conciencia de la falta de agua, del cuidado de la misma y por ende, de pago por el servicio; quizá todo lo anterior se debe a una grave falta de gestión adecuada del recurso.

México tiene una superficie de 1,967,183 km². El agua se distribuye de una forma muy irregular en el país: de la superficie total, el 56% es árido o semiárido, es decir, los estados del norte abarcan el 50% de la superficie y allí llueve sólo 25% del total. En la parte angosta del país, que ocupa el 27% del territorio, cae la mayoría del agua de lluvia (49.6%) en los estados del sur-sureste [VII].

Como puede observarse, la disponibilidad natural del agua en el país muestra grandes contrastes; en las zonas con superficie árida o semiárida, se presentan apenas el 32% de los escurrimientos, se encuentra el 76% de la población del país, 90% de la irrigación, 70% de la industria y se genera el 77% del producto interno bruto [VII].

El país tiene una precipitación media anual de 772 milímetros (un milímetro de lluvia equivale a un litro por metro cuadrado), existe una evaporación media anual de 1,095 km³/año y una recarga de acuíferos de 66 km³/año. [IX].

En la Figura 1.1 se muestran un comparativo de la precipitación anual de varias ciudades en el mundo incluyendo México, en la que se puede observar claramente que las grandes variaciones de la precipitación en nuestro país hacen difícil el aprovechamiento del recurso.

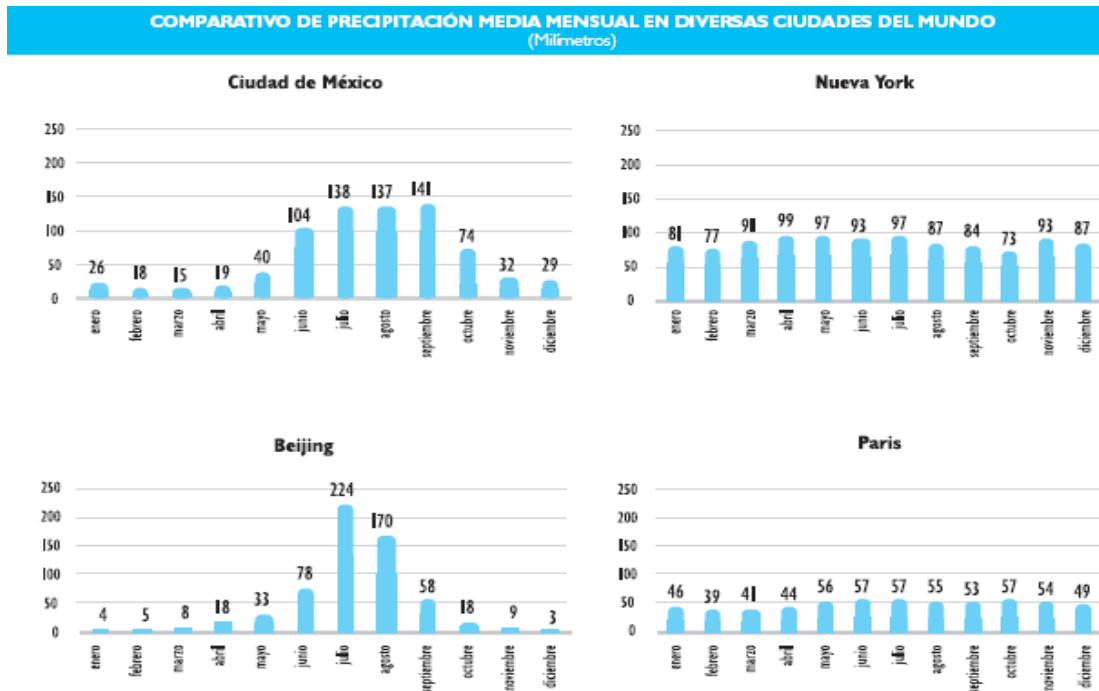


Figura 1.1 Comparativo de precipitación media mensual en diversas ciudades del mundo. Reunión Nacional de Estadística en Aguascalientes, Ags. Mayo del 2008. Conagua.

Un problema palpable es que algunos estados del país padecen de una escasez de agua que dificulta su extracción y otros en donde representa hasta un problema el hecho de la gran abundancia de la misma. De acuerdo con datos proporcionados por la CNA, el 50% de la población cuenta con menos del 20% del recurso, mientras que en el sureste el 20% de la población tiene más del 50% de agua. Actualmente, la disponibilidad per cápita de agua en promedio, en el país, es de 4,547 m³/año.

Tabla 1.4 Promedios para el país en los que destaca la enorme inequidad en materia de precipitación pluvial media anual para algunas entidades de la República durante el periodo 1941 – 2005.

| Media Nacional | 772 milímetros |
|----------------------------|----------------|
| Tabasco | 2,405.8 |
| Chiapas | 1,968.9 |
| Baja California | 203.7 |
| Baja California Sur | 176.2 |

Fuente: Subdirección General Técnica. Conagua.

El grado de presión sobre el agua es el porcentaje de la disponibilidad de agua que es empleada en usos consuntivos. El indicador es de 47% en la zona norte y noroeste del país y únicamente del 3% en el sur-sureste. Ver Figura 1.2.

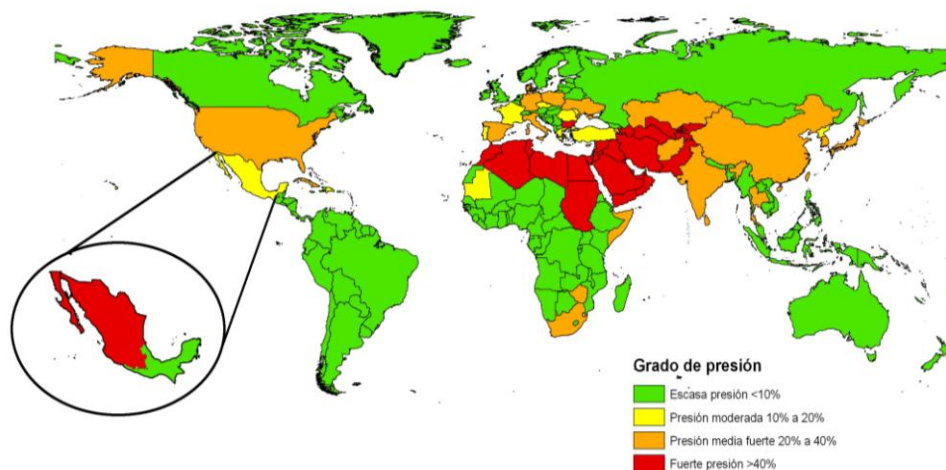


Figura 1.2. Grado de presión sobre el recurso hídrico en el país. Reunión Nacional de Estadística en Aguascalientes, Ags. Mayo del 2008. CONAGUA.

Por otra parte, la disminución del volumen de agua de los ríos debido a la extracción para uso agrícola disminuye su capacidad de autopurificación, por lo que se necesita apremiantemente intensificar la modernización de la infraestructura en este ramo con la finalidad de encontrar estrategias para usar más eficientemente el agua y mantener las fuentes de abastecimiento en buen estado.

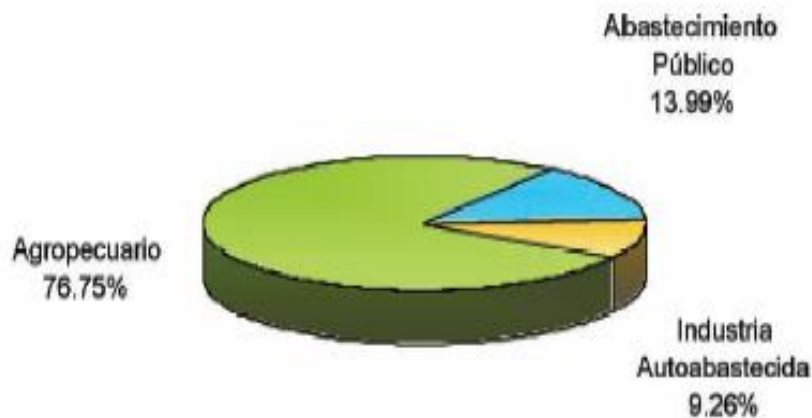
Para la extracción de agua del subsuelo se cuenta a nivel nacional con 653 acuíferos, de los cuales 102 están sobreexplotados, 17 están contaminados con intrusión salina y trece presentan el fenómeno de la salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. De los acuíferos sobreexplotados se extrae aproximadamente el 57% del agua subterránea que se emplea en el país. Debido a la sobreexplotación, la reserva del agua se está minando a un ritmo de 6 km³/año.

En 1955, la disponibilidad de agua en el país era de 11,500 m³/habitante/año, para 2003 había descendido a 4,547 y se estima que para 2020 disminuirá a 3,500 m³/habitante/año, es decir, hace menos de 50 años disponíamos de más del doble de agua por persona. En la Figura 1.3 se muestran los tres sectores más importantes del país que consumen más agua y las proporciones en la que la utilizan [VII].

En México, la clasificación que realiza la Subdirección General Técnica de Conagua, en cuanto a la disponibilidad media per cápita es la siguiente:

| | |
|-------------------------------------|---------------------|
| Menor de 1,000 m ³ /año: | Extremadamente baja |
| 1,000 a 2,000 m ³ /año: | Muy baja |

Distribución porcentual del agua concesionada para usos fuera del cuerpo de agua
(acumulado a diciembre de 2005)



Fuente: Subdirección General de Administración del Agua. CONAGUA.

Figura 1.3 Distribución porcentual del agua concesionada para usos fuera del cuerpo de agua.

Fuente: Subdirección General de Administración del Agua. Conagua.

México está catalogado a nivel mundial, entre los países con disponibilidad de agua Baja (entre 1,000 y 5,000 m³/habitante/año), y la tendencia indica que seguirá bajando esta disponibilidad a medida que la población crece. En resumen, destacan dos zonas importantes de disponibilidad, como se puede observar en la Figura 1.4.

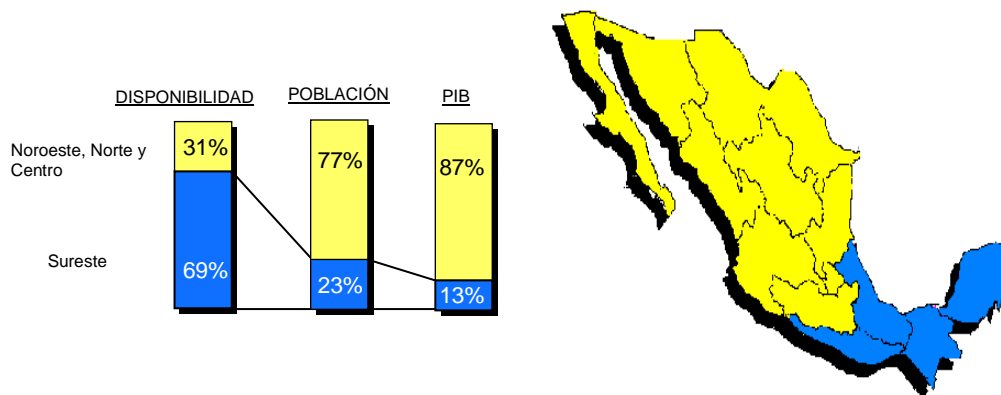


Figura 1.4 Contraste Relación disponibilidad-población-PIB. Fuente: Subdirección General de Programación. Conagua.

El crecimiento poblacional y por ende económico en nuestro país se ha dado en zonas geográficas en donde el recurso hídrico es gravemente escaso, lo que ha ocasionado que el problema ya sea palpable incluso en zonas en donde tiempo atrás ni se percibía, por lo que actualmente el volumen demandado es mayor al suministrado; la competencia por el agua en México ya es una causa grave de conflictos dándose tanto a nivel estatal como entre las mismas ciudades y municipios.

1.3 La urgente necesidad de obtener recursos hídricos de buena calidad, respetando los ecosistemas.

Las sociedades en la actualidad han convertido el agua en un producto, con este hecho se dio lugar a una gran pérdida de conciencia de toda la gente en cuanto al uso y aprovechamiento del agua. Los ríos, lagos y océanos han pasado a ser mercancías y lugares en los que se desalojan residuos, la consecuencia ha sido el sobrebombeo y la deforestación: todos nuestros cuerpos de agua se están secando irremediablemente.

En lo que se refiere a los consumos de agua para satisfacer su requerimiento tanto en la vivienda, comercio e industria, han aumentado en los últimos años; tanto en el caso de las regiones donde existe agua en abundancia, en las que se han realizado grandes inversiones en infraestructura tratando de ampliar sistemas de abastecimiento, drenaje, tratamiento de aguas residuales y riego; como en las regiones en las que la poca agua con la que cuentan ya se tiene comprometida la existente debido a su mal uso.

Se requiere pues de soluciones urgentes e inaplazables para el control y recuperación de los cuerpos de agua; por otro lado, debido a la contaminación ambiental causada por aguas residuales, como son vertidos a la atmósfera, residuos sólidos, etc., una cantidad importante del agua dulce disponible sufre ya algún tipo de contaminación.

A manera de resumen, en lo que se refiere a la situación del agua actual en el mundo y en México, podemos concluir que los centros urbanos enfrentan el problema de agotamiento de las fuentes locales y su elevada contaminación, los altos costos de captación y conducción del agua y los conflictos generados por los intereses de diferentes usuarios sobre las fuentes.

A pesar de que los esfuerzos en la gestión en materia del agua a nivel mundial están ayudando a aliviar el impacto en su abuso, se está llegando a los límites de disponibilidad sustentable.

Al analizar la reducción tan grande en la disponibilidad de agua media per cápita de hace algunos años a la fecha, y que la tendencia es disminuir esta disponibilidad en pocos años, además de considerar el gran problema de la alta contaminación en nuestras fuentes naturales (superficiales y subterráneas) así como el grave problema del calentamiento global que irremediablemente está ya afectando y afectará más, no se sabe en qué medida, nuestros niveles de disponibilidad, podemos estar seguros de que estamos frente a un gran problema.

Nuestras inversiones en infraestructura deberán ser mayúsculas, o bien, podemos comenzar a pensar en la posibilidad de soluciones y/o tecnologías alternativas, que reduzcan la brecha que existe entre las actuales condiciones de agua en muchos lugares de nuestro país, más benévolas con nuestros ecosistemas y más viables económicamente, obteniendo agua limpia y de buena calidad proporcionando una solución de manera inmediata, barata y sencilla.

1.3.1 Desalinización de agua de mar y agua salobre.

Si consideramos que tenemos en el mundo mucho más agua salada que agua dulce y una vez analizada la problemática en lo referente al agua dulce en el mundo y en nuestro país, se comprende claramente que resulta necesario recurrir a todos los recursos posibles con el fin de lograr aportes de agua que cumplan con los requerimientos para el uso y consumo humano.

Uno de los procesos que permiten ese aporte es la desalinización de agua de mar y agua salobre, que en la actualidad han incrementado potencialmente las esperanzas para cubrir las necesidades futuras del agua.

La capacidad mundial de desalinización crece año tras año y amplias zonas de Australia, Oriente Medio, España, EEUU, Reino Unido, India y China cuentan a la fecha con grandes plantas desalinizadoras.

Se estima que alrededor del 60% de las necesidades de agua dulce en el Golfo Pérsico se satisfacen con la desalinización, en gran parte con tratamientos térmicos, en la región de Oriente Medio, están instalando plantas de desalinización para convertir el agua salina (agua del mar, agua salobre o aguas residuales tratadas) en agua dulce. Actualmente, el mercado mundial de la desalinización representa unos 35,000 millones de USD al año y esta cifra podría duplicarse en los próximos 15 años.

La población de Perth, Australia prevé satisfacer un tercio de su demanda por este método. España registra también un crecimiento importante de la capacidad de desalinización que ha llevado el número de instalaciones desalinizadoras hasta más de 700.

Estados Unidos es uno de los usuarios de agua desalinizada más importantes (6.5%); destacando California y ciertas zonas de Florida. Las plantas desaladoras están siendo utilizadas en más de 100 ciudades.

Como se puede observar, las zonas en las que más ha crecido la desalinización son las más afectadas por la escasez de agua y las densamente pobladas.

Hoy en día existen muchas alternativas para la desalinización de agua, sea ésta de mar o salobre pero debe mencionarse que en función del método que se utilice, los costos de desalinización pueden ser muy elevados y pueden llegar a ser inmensamente agresivos con el medio ambiente.

La purificación de fluidos específicamente la desalinización de agua, utilizando como fuente energética la radiación solar, es una técnica ya desarrollada con grandes ventajas económicas, sobre todo por el ahorro de electricidad o petróleo, así como la calidad del agua obtenida. Las experiencias acumuladas son contundentes en demostrar que la destilación solar del agua de mar o salobre es una opción tecnológica y económicamente factible.

1.3.2 Potabilización de aguas residuales industriales.

Todas las aguas naturales contienen varios contaminantes que provienen de la erosión, la lixiviación y los procesos de la intemperie, a esta contaminación natural, se agregan las causadas por aguas residuales de origen doméstico, agrícola o industrial.

Como se mencionó anteriormente, cualquier cuerpo de agua es capaz de asimilar cierta cantidad de contaminación sin efectos serios, debido a la autpurificación de éstos, si hay contaminación adicional, se altera la naturaleza del agua receptora y deja de ser adecuada para sus diferentes usos.

Dado el papel que juega el agua en el desarrollo de la vida, cuando está contaminada se convierte en un medio con gran potencial para transmitir una amplia variedad de males y enfermedades.

El hecho de que se logre descontaminar el agua residual ya sea de origen municipal, industrial o de riego mediante algún tipo de tratamiento ayuda primero a reutilizar esta agua ya sea en riego, en jardines públicos y servicios sanitarios, por mencionar algunos.

Por otra parte, el agua una vez tratada y depositada en los cuerpos de agua de la localidad, llegan a éstos con mucho menos contaminantes contribuyendo así a su autodepuración.

Enfocándonos en la industria, se debe mencionar que ésta no solo produce aguas residuales, sino que exige un gran aporte de agua, básicamente para los circuitos de refrigeración, lavado y transporte de sólidos, lavado de superficies, mantenimiento de presión y uso por parte del personal que trabaja en la misma.

Cada industria produce un tipo muy concreto de aguas residuales industriales, por lo que es necesario conocer los orígenes de los efluentes, así como los niveles de contaminación de cada uno de ellos y la normativa legal vigente sobre los límites admisibles relativos a vertidos.

La calidad del agua obtenida por destilación solar es apta para el consumo humano, tan sólo con un pequeño tratamiento en algunos casos.

Considerando el agua para uso industrial, es necesario estudiar de forma individualizada cada caso, en la mayoría de ellos, los requerimientos mínimos siempre van a ser menores que los del agua potable, con lo que este método cumple holgadamente dichos requerimientos.

1.4 El uso de la energía como fuente de transformación: ventajas y desventajas de la energía solar

Por su fuente de extracción existen dos tipos de energía: renovables, que se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil no se agotan, comprenden las convencionales (hidráulica) y no convencionales (eólica, solar, geotérmica, océanos y la procedente de la biomasa).

Por otra parte las no renovables, son aquellas que se encuentran en forma limitada en nuestro planeta y se agotan a medida que se les consume (nuclear, carbón, gas natural, petróleo).

Como se mencionó anteriormente, las energías renovables, comprenden un conjunto de fuentes energéticas que no se agotarán. Estas fuentes forman parte de una alternativa con respecto a las tradicionales y definitivamente no constituyen ningún tipo de agresión con el medio ambiente o quizá pudieran producir un impacto ambiental mínimo.

La energía solar es la energía que llega a la Tierra proveniente de la estrella más cercana a nuestro planeta, el sol, también llamada energía alternativa, blanda o verde; esta energía abarca un amplio espectro de radiación electromagnética, donde la luz solar es la parte visible de este espectro. Su radiación varía de acuerdo con el día puesto que depende de las condiciones atmosféricas y latitudes, puede irradiar más de 1,000 W/m².

El hombre puede transformar la energía solar en energía térmica o eléctrica. La electricidad es obtenida por paneles fotovoltaicos, los que cuentan con un conjunto de celdas solares y proporcionan energía a las comunidades rurales.

En lo que respecta a la energía térmica, es obtenida mediante colectores térmicos y ésta es aprovechada para elevar la temperatura de un fluido, como por ejemplo el agua, para el consumo doméstico o industrial.

Entre las principales ventajas que se pueden mencionar en lo que respecta al uso de energía solar para purificación de agua mediante su calentamiento son [XXI]:

- a) La eliminación por completo de impactos negativos al medio ambiente como podría ser el caso de la producción de CO₂ en relación con el consumo energético o bien, la contaminación del medio marino, tanto flora como fauna (vertido de salmuera en el caso de las grandes plantas desaladoras), incluso, contaminación visual.
- b) No requiere de suministro de energía, los dispositivos pueden ser instalados tanto rápida como fácilmente.
- c) Se necesita muy poca inversión en caso de una instalación doméstica.
- d) Escaso mantenimiento.
- e) Con este proceso simple, económico y respetuoso con el medio ambiente, se logra separar del agua cualquier presencia de metales pesados (Pb, As, Hg), minerales (Fe, Mn), nitratos, sales, organismos microbiológicos

patógenos para el ser humano (*E. Coli* y *Giardia*), la energía solar es una energía renovable, es una energía gratuita, es una energía inagotable.

Por otra parte, en cuanto a las desventajas podemos mencionar principalmente que:

- a) El agua producto que se obtiene es en poca cantidad.
- b) Otro punto en contra habitual de los diversos usos de calor solar es su alto consumo de terreno.
- c) Para utilizarla a gran escala es necesaria una inversión inicial elevada, es decir, en el caso de requerirse grandes cantidades de agua purificada, dado que los sistemas de captación son relativamente caros puesto que se requiere de gran superficie.
- d) Se tiene que transformar en el momento que llega en energía térmica o eléctrica puesto que no se dispone de ningún sistema de almacenamiento eficaz.

La destilación solar es una tecnología muy bien conocida. El primer uso de los destiladores data de 1551 cuando era usada por los alquimistas árabes. Otros científicos utilizaron destiladores en los siguientes siglos, incluyendo a Della Porta (1589), Lavoisier (1862) y Mauchot (1869).

La primera planta de destilación solar convencional se construyó en 1872 por el ingeniero sueco Charles Wilson en la comunidad minera de La Salinas en lo que hoy es el norte de Chile. Wilson necesitaba agua para las mulas de una obra minera, nació la primera instalación industrial de destilación solar porque sólo encontró fuentes de agua salobre. (Harding, 1883). Este era un tipo de destilador con gran depósito que se usaba para proporcionar agua fresca utilizando agua salina para una población dedicada a la extracción de nitratos.

La planta usaba compartimientos de madera (1.4 m x 61.0 m, que tenía fondo negro teñido con alumbre. Esta planta estuvo en operación hasta 1904.

El proceso de la destilación de agua sirve de base para la determinación de parámetros que permitan afinar un análisis de factibilidad para instalaciones mayores que favorezcan el desarrollo humano sostenidamente en regiones donde el agua dulce es escasa.

Es cada vez más necesaria la búsqueda de alternativas energéticas que sirvan para alimentar las necesidades y demandas de la sociedad, por lo que con la destilación solar se plantean nuevos objetivos para la actuación, enfocadas a fuentes de energías renovables que no causan alteraciones graves al medio ambiente, que garantizan su preservación y evitan la explotación irracional de las materias primas.

La situación y demanda social actual hacen preciso la utilización de estas alternativas energéticas, puesto que junto con el ahorro y el aprovechamiento de los recursos son la clave para un futuro limpio, seguro y eficaz.

1.5 Panorama general de la destilación: La destilación en el mundo y en México. Los procesos existentes a la fecha

En lo que se refiere a la destilación solar del agua, sigue el mismo concepto de la forma en la que la naturaleza purifica el agua y es uno de los métodos más simples y eficientes, cuando se dispone de espacio suficiente al aire libre y el agua de suministro es salobre o con contaminación de metales pesados o nitratos.

Por medio de la construcción de un destilador de caseta, que es uno de los métodos más sencillos y eficaces de purificación en la actualidad, la energía del sol (sólo utiliza al sol como fuente de energía), calienta el agua hasta su punto de evaporación. El vapor sube y se condensa en la superficie del Destilador de agua, es decir, en las paredes interiores de la caseta de vidrio, donde es recogida para su utilización.

Como se puede observar, el factor o parámetro más importante que afecta la producción de agua destilada es la intensidad de la energía solar, es decir, la irradiancia: la cantidad de agua destilada obtenida está en función de la cantidad de energía utilizada para la vaporización de agua contenida dentro del destilador. La eficiencia del destilador es la cantidad de energía utilizada en la vaporización de agua en el destilador sobre la cantidad de incidencia de energía solar en el destilador.

A grandes rasgos, la operación de un destilador requiere primero que la orientación de éste sea frente al sol todo el día, ya al atardecer, enjuagarlo y agregar agua, de preferencia se llena con un volumen del doble de lo que puede retener el recipiente que contenga el agua producto, se debe pues recolectar en un recipiente apropiado, al final del día. Pueden ubicarse varios destiladores en serie y en paralelo, de preferencia en los techos de las casas. Posteriormente, se profundizará en este tema.

Los habitantes de las zonas rurales en las que se adapten los destiladores, se deberán abastecer de agua de pozos cercanos, así obtendrán agua de excelente calidad diariamente.

1.5.1 Situación de la destilación solar en el mundo y en México.

Como se mencionó anteriormente, Chile fue el primer país que utilizó la energía solar con fines industriales, en el año de 1872 se construyó la primera planta desalinizadora solar del mundo, en la localidad de Las Salinas, entre Antofagasta y Calama, funcionaba como un proceso de destilación, tipo hot box, con capacidad de 15,500 m³, produjo 22,700 litros de agua dulce por día y funcionó por 40 años.

En España, la sequía o simplemente las malas prácticas urbanísticas, que crean asentamientos artificiales en lugares que no serían habitables sin el apoyo de infraestructuras, han obligado a que buena parte del agua que se bebe en esas zonas, hasta 35 millones de metros cúbicos al día, venga del mar.

En este país las dos tecnologías de desalación más usadas son la destilación y ósmosis inversa. Se han hecho fuertes inversiones en experimentos, con una planta de destilación

solar, que se han desarrollado durante los últimos años en la Plataforma Solar de Andalucía, dependiente del Cimat, mismos que han servido para fijar cuáles son los obstáculos que deben salvar científicos e ingenieros antes de que puedan beber agua barata y desalada sólo con el sol [CIEMAT, 2008].

El Grupo de Energía Solar de Ciudad de La Habana (actualmente Cubaenergía) y el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) de Santiago de Cuba, ambos pertenecientes al CITMA, han desarrollado investigaciones en la temática de destilación solar durante más de 20 años, lo cual permite contar con experiencias suficientes para dar respuesta a la necesidad de agua destilada y potable mediante este proceso de aprovechamiento térmico de la energía solar.

En Cuba los destiladores eléctricos de 1 a 4 Kw, están extendidos en el todo el país en laboratorios de hospitales, policlínicos, escuelas, universidades e incluso, industrias. Estos, además de consumir una cantidad considerable de energía, gastan una gran cantidad de agua para la condensación. El agua destilada se utiliza mucho en el transporte, y su necesidad es grande tanto en las ciudades, como en lugares aislados.

Los destiladores solares pueden ser construidos de muchas formas y con diferentes materiales, así como pueden ser destinados a diferentes usos. Pueden ser fijos o portátiles, perennes o transitorios. Pueden ser construidos masivamente en industrias, o uno por uno en serie e incluso pueden ser de construcción casera. Ver Figura 1.5.



Figura 1.5 Destiladores solares de caseta en una azotea de La Habana Vieja. [XIII].

En Costa Rica existen cerca de 80 a 100 estaciones meteorológicas distribuidas en todo su territorio, las cuales cuentan con equipos para medir la cantidad de radiación y brillo solar, mismos datos que difieren de acuerdo a cada región del país, sin embargo, mediante diferentes estaciones se pueden conseguir con el Instituto Meteorológico Nacional, la radiación global anual medida en varios lugares de Costa Rica. El valor oscila entre 1,320 (San José) y 1,970 (Taboga) Kw-h/m² año y estos datos son muy importantes para cualquier aplicación o simulación de sistemas solares.

En Costa Rica, a lo largo de las costas, hay un elevado número de comunidades que carecen de agua potable, se tiene que usar del río, pozo y mar etc., por lo que es necesario recurrir a la purificación del agua. En este sentido, para este país, la destilación solar se presenta como una alternativa factible, utilizando agua de mar o de pozo, por lo que es ampliamente utilizado este método resolviendo, en algunas comunidades, en las que ya se aplica, por completo el problema de la falta de agua y logrando así amplios beneficios para las poblaciones rurales [XIV].

En México, se han llevado a cabo diferentes proyectos rurales, de acuerdo a las necesidades de cada región, especialmente en varias comunidades ubicadas en la zona fronteriza México-Estados Unidos, que no cuentan con el servicio de agua potable. En esta zona se implementaron tres proyectos que consistieron en la instalación de destiladores solares con los que se ha venido trabajando.

Estos proyectos han tenido gran aceptación por su fácil manejo y logros obtenidos entre los habitantes que se han visto beneficiados, asimismo, han sido de gran impacto social y ha generado varias solicitudes de otras familias que están interesadas en adquirir estos destiladores.

Por otro lado, en el estado de Chihuahua, en la Sierra Tarahumara y en Juárez se han realizado varios proyectos, instalando destiladores con el apoyo del programa de energía renovable de Sandía National Laboratories y la Asociación de Energía Solar de El Paso en colaboración con la Universidad Estatal de Nuevo México y el Grupo de Trabajo de Energía Renovable de Chihuahua, respectivamente [XXI].

En otra localidad en la que se ha trabajado con este tipo de destiladores solares es en Nogueras, en el valle de Colima. Ahí, la Universidad de Colima lleva a cabo el proyecto ambiental demostrativo del Ecoparque Nogueras, en donde maestros y estudiantes han diseñado dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar, entre los que se encuentra un prototipo de un destilador solar doméstico como el mostrado en la Figura 1.6.



Figura 1.6 Uno de los diferentes destiladores solares caseros utilizado en México.

1.5.2 Procesos de destilación térmica existentes a la fecha [XI].

Tipos de tecnologías:

- a) Destilación multi-etapa Flash (MSF)
- b) Destilación de múltiple efecto (MED)
- c) Destilación por compresión de vapor (VC)
- d) Destiladores solares convencionales

a) Destilación multi-etapa Flash (MSF)

Este tipo de plantas se utiliza especialmente para la desalinización de agua de mar. La capacidad de las plantas MSF es mucho mayor que otras plantas destiladoras en virtud a la cantidad de etapas conectadas en cascada sin problemas de operación. Sin embargo, las plantas MSF tienen un grave inconveniente.

Su consumo específico, definido como la cantidad de energía consumida para producir metro cúbico de agua desalada, es de los más altos. A este consumo contribuyen el consumo térmico proveniente de la planta productora de electricidad, más alto que otros procesos de destilación debido al efecto flash; y el consumo eléctrico debido al gran número de bombas necesarias para la circulación de los flujos de planta. Además de su alto costo de operación, su costo de instalación no es más bajo que otros procesos de desalación.

En la Figura 1.7 se puede observar una planta desaladora MSF.



Figura 1.7 Desaladora MSF. *Introducción a la Desalación.* Curso impartido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 28 de mayo del 2007 por José Antonio San Juan, Presidente de IDA.

b) Destilación por múltiple efecto (MED)

Al igual que las plantas MSF, las plantas MED se utilizan para la desalación de agua de mar. La desalación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo.

Una planta MED (Multi-Effect Distillation) tiene varias etapas conectadas en serie a diferentes presiones de operación, dichos efectos sucesivos tienen cada vez un punto de ebullición más bajo por el efectos de dicha presión. Esto permite que el agua de alimentación experimente múltiples ebulliciones, en los sucesivos efectos, sin necesidad de recurrir a calor adicional a partir del primer efecto. El agua salada se transfiere luego al efecto siguiente para sufrir una evaporación y el ciclo se repite, utilizando el vapor generado en cada efecto.

Normalmente también existen cámaras flash para evaporar una porción del agua salada que pasa al siguiente efecto, gracias a su menor presión de operación. La primera etapa se nutre de vapor externo de un sistema recuperativo, una turbina de contrapresión (ó extracción de una de condensación). Un condensador final recoge el agua dulce en la última etapa precalentando el agua de aportación al sistema. Por lo tanto las plantas MED también conforman sistemas de cogeneración al igual que las MSF consumiendo una porción de energía destinada a la producción eléctrica.

La capacidad de este tipo de plantas suele ser más reducida que las MSF (nunca suele superar los 15,000 m³/día) aunque ello se debe más a razones de índole política que operativa: las MSF más grandes se instalan en Oriente Medio y las mayores MED están instaladas en las islas del Caribe para abastecer de agua estas zonas de gran presión turística.

En las Figuras 1.8 y 1.9, se puede analizar el diagrama de proceso de una instalación MED y una fotografía de una Planta desaladora MED, respectivamente.

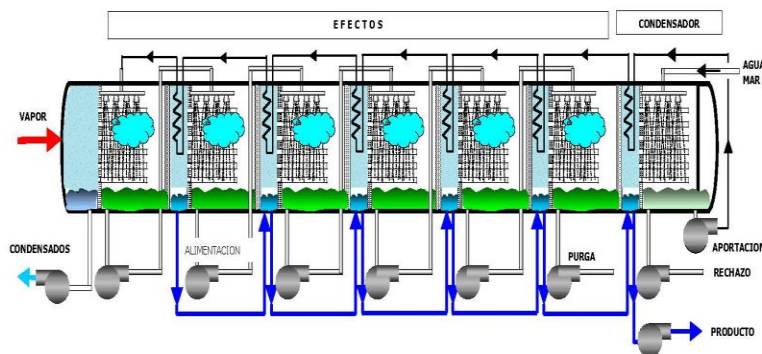


Figura 1.8 Diagrama de proceso de MED. "Introducción a la Desalación". Curso impartido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 28 de mayo del 2007 por José Antonio San Juan, Presidente de IDA.



Figura 1.9 Planta desaladora MED. "Introducción a la Desalación". Curso impartido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 28 de mayo del 2007 por José Antonio San Juan, Presidente de IDA.

c) Compresión térmica de vapor (TVC o CV)

Al igual que los dos procesos anteriores, este proceso es utilizado para la desalinización de agua de mar.

La compresión térmica de vapor (TVC, Thermal Vapor Compression) obtiene el agua destilada con el mismo proceso que una destilación por múltiple efecto (MED), pero utiliza una fuente de energía térmica diferente: son los llamados compresores térmicos (o termocompresores) que consumen vapor de media presión proveniente de la planta de producción eléctrica (si tenemos una planta dual, sino sería de un vapor de proceso obtenido expresamente para ello) y que succiona parte del vapor generado en la última etapa a muy baja presión, comprimiéndose y dando lugar a un vapor de presión intermedia a las anteriores adecuado para aportarse a la primera etapa, que es la única que consume energía en el proceso. Ver Figura 1.10.

El rendimiento de este tipo de plantas es similar a las de las plantas MED, sin embargo su capacidad desaladora puede ser mucho mayor al permitirse una mayor adaptabilidad de toma de vapor de las plantas productoras del mismo. El proceso de Compresión Mecánica de Vapor se propone para gastos menores, por ejemplo, comunidades pequeñas, centrales termoeléctricas, etc.



Figura 1.10 Planta desalinizadora por CV. *Introducción a la Desalación.* Curso impartido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 28 de mayo del 2007 por José Antonio San Juan, Presidente de IDA.

d) Destiladores solares convencionales [XVIII].

La energía solar es el método ideal para producir agua en zonas áridas y muy aisladas del resto de poblaciones. El principio básico es el del efecto invernadero: el sol calienta una cámara de aire a través de un vidrio transparente, en cuyo fondo tenemos agua a destilar en reposo.

Dependiendo de la radiación solar y otros factores como la velocidad del viento (que enfría el vidrio exterior), una fracción de esta agua se evapora y se condensa en la cara interior del vidrio. Como dicho vidrio está colocado inclinado, las gotas caen en un canal que va recogiendo dicho condensado evitando que vuelvan a caer en el proceso de condensación a la lámina inferior de salmuera.

i) El destilador de caseta

El destilador solar de caseta es el más conocido y difundido en el mundo y consiste en una caseta de material semitransparente, generalmente vidrio, que se coloca sobre una bandeja que contiene agua a destilar. Por la forma de la caseta y la forma en que ésta atrapa el calor, proveniente de la energía solar, también se les conoce como destiladores de invernaderos. Ver figuras 1.6 y 2.2.

ii) El destilador de poceta.

En la Figura 1.11 se puede observar la geometría y partes que conforman un destilador solar de poceta.

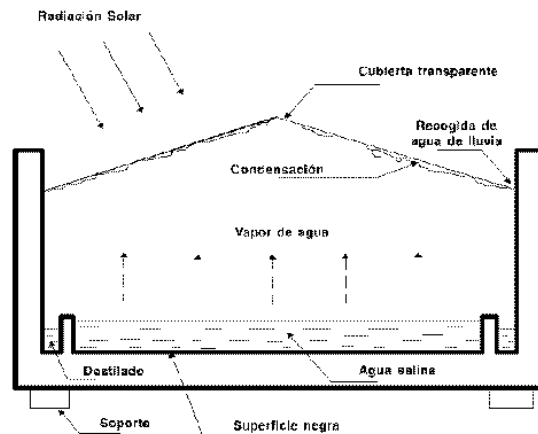


Figura 1.11 Destilador de poceta. *Vergelización del desierto.* Publicado por LHZ. Leandro Herrera Fernando Puchi. Versión 1; Marzo 2006

Al destilador de poceta es sencillo y de fácil construcción y está formado por una poceta hecha generalmente con materiales de la construcción (ladrillos o bloques, piedra de arena), angulares de acero y láminas de vidrios. Su construcción es la más sencilla de

todas y debe ser en el sitio a destilar, realizada principalmente por un albañil. Se recomienda su uso en instalaciones relativamente grandes hechas con recursos propios.

iii) Destilador de cascada

En la figura 1.12 se puede apreciar la geometría y partes que conforman un destilador de cascada.

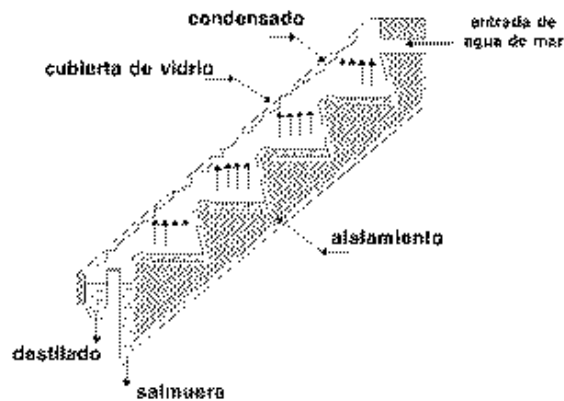


Figura 1.12 Destilador de cascada. *Vergelización del desierto.* Publicado por LHZ. Leandro Herrera Fernando Puchi. Versión 1; Marzo 2006

El destilador de cascada toma su nombre porque al llenarse o al limpiarse, el agua corre en forma de cascada, sin embargo, en su funcionamiento normal el agua contenida en el destilador permanece prácticamente estática.

1.6 Análisis energético de un destilador solar.

Conceptos básicos de energía solar.

Para llevar a cabo el análisis energético de un destilador solar de agua, es necesario dominar algunos conceptos que, por su importancia en los resultados que se espera obtener, se mencionan a continuación:

La tierra recibe anualmente $1,5 \times 1,018$ Kw-h de energía solar, lo que corresponde a 10,000 veces el consumo mundial de energía en ese período, la radiación solar constituye una inagotable fuente energética, por lo que existe un enorme potencial de utilización por medio de sistemas de captación y conversión en otra forma de energía (térmica, eléctrica, etc.).

Nuestra relación directa con el sol, a pesar de estar a 150 millones de Km de distancia hace que se intercepten una parte de la radiación producida por éste. La radiación solar son ondas electromagnéticas que se emiten en todas las longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el cercano infrarrojo, con valores que van desde 250 nm hasta 2,500 nm. Una gráfica del espectro de la radiación solar se presenta en la Figura 1.13.

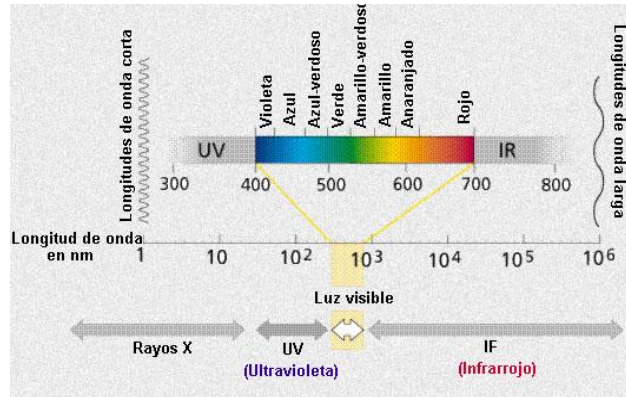


Figura 1.13. Espectro solar. Todos los colores visibles del Sol, obtenidos al hacer pasar la luz solar a través de un dispositivo parecido a un prisma.

La luz visible está compuesta por varios colores, que cuando se mezclan forman la luz blanca, por lo que también se le da ese nombre. Cada uno de los colores tiene una longitud de onda específica, con límites entre 0.43 y 0.69 μm .

La irradiancia. Es la densidad de flujo radiante que penetra en una superficie. Se mide en w/m^2 .

La intensidad de radiación oscila entre 1,300 y 1,400 w/m^2 . Las pérdidas en la atmósfera por absorción, reflexión y dispersión la reducen un 30%.

Si las condiciones climatológicas son buenas podemos llegar a tener 1,000 w/m^2 , aunque si las condiciones son pésimas podemos tener sólo 50 w/m^2 , por eso estamos obligados a utilizar superficies de captación grandes.

En la Figura 1.14 se puede apreciar la distribución de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, asimismo, en la Figura 1.15 se observan las isolíneas de insolación promedio anual para la República Mexicana.

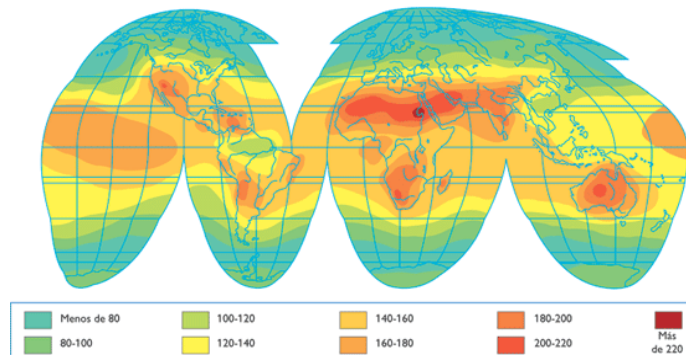


Figura 1.14 Distribución de la radiación solar que llega a la superficie terrestre, expresada en $\text{kcal}/(\text{cm}^2/\text{año})$. La radiación solar se distribuye de modo diferente a lo largo de la superficie terrestre.

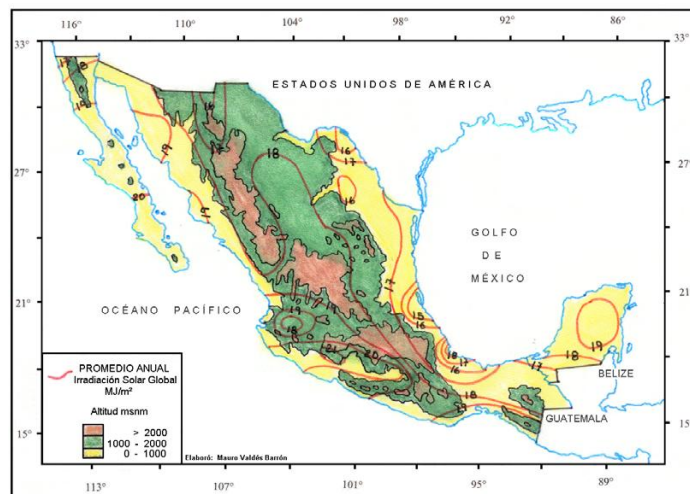


Figura 1.15 Isótopas de Insolación promedio anual para México, en $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$; adaptado de Galindo y Valdés, 1992.

El espectro solar. La luz solar se compone de un espectro de varias longitudes de onda, visibles e invisibles, que se extienden de 250 a 2,500 nm. La radiación emitida por el sol es absorbida parcialmente por la capa de ozono, las nubes y la contaminación atmosférica (ver Figura 1.13).

Aunque el sol es amarillento, emite luz en prácticamente todos los colores, de hecho es más brillante en el verde-amarillo. Se pueden observar manchas oscuras en el espectro que surgen del gas en o por encima de la superficie del sol absorbiendo la luz solar emitida debajo. Ya que diferentes tipos de gas absorben diferentes colores de luz, es posible determinar qué gases componen el sol. El Helio, por ejemplo, fue descubierto en 1870 en un espectro solar y hasta después encontrado aquí en la Tierra.

Energía. La energía es la capacidad para producir un trabajo. La energía se halla en cada proceso de la tierra; el calor, el viento, la vida, el movimiento. Según sea el proceso, la energía se denomina: térmica, eléctrica, radiante, química, nuclear. Su unidad de medida es el Joule.

La energía térmica es la forma de energía que interviene en los fenómenos caloríficos. Cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se ponen en contacto, el caliente comunica energía al frío; el tipo de energía que se cede de un cuerpo a otro como consecuencia de una diferencia de temperaturas es precisamente la energía térmica.

La energía térmica de un cuerpo es la energía resultante de sumar todas las energías mecánicas asociadas a los movimientos de las diferentes partículas que lo componen. La cantidad de energía térmica que un cuerpo pierde o gana en contacto con otro a diferente temperatura recibe el nombre de calor.

El calor constituye, por lo tanto, una medida de la energía térmica puesta en juego en los fenómenos caloríficos.

1.6.1 Procesos físicos que se producen en un destilador solar.

a) Convección.

Es la transmisión de calor por un cuerpo con desplazamiento de las moléculas. El calor fluye del emisor calentando el aire ambiente y, a medida que prosigue este calentamiento, disminuye el peso específico del mismo, haciéndose más ligero y ascendiendo. El natural empuje ascendente del aire origina un movimiento lento del mismo, calentando el local de manera uniforme.

Este movimiento puede ser realizado mediante métodos mecánicos externos (bombas, ventiladores, etc.) o bien como resultado de la diferencia de densidades que se produce en el fluido como consecuencia del aporte calorífico al cual esta sometido. En el primer caso se habla de una convección forzada mientras que en el segundo caso, cuando no existe una ayuda para aumentar el movimiento del fluido, se hablara de convección libre.

En el caso específico de un destilador solar de agua se debe procurar maximizar esta propiedad, debido a que nos aumenta la cantidad de agua purificada obtenida diariamente.

La transferencia de calor por convección se modela con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf})$$

Donde h es el coeficiente de convección, A_s es el área del cuerpo en contacto con el fluido, T_s es la temperatura en la superficie del cuerpo y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

Si la temperatura T del cuerpo es mayor que la temperatura del medio ambiente (T_{ar}) el cuerpo pierde una cantidad de calor dQ en el intervalo de tiempo comprendido entre t y $t+dt$, disminuyendo su temperatura T en dT .

$$dQ = -m C dT$$

donde $m = \rho V$ = la masa del cuerpo (ρ es la densidad y V es el volumen), C el calor específico.

La ecuación que nos da la variación de la temperatura T del cuerpo en función del tiempo es:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a)$$

Integrando esta ecuación con la condición inicial de que en el instante $t = 0$, la temperatura del cuerpo es T_0 .

b) Conducción.

Es la transmisión de calor por un cuerpo sin desplazamiento de sus moléculas. Si un átomo vibra más intensamente que su átomo vecino como consecuencia de los impactos moleculares, cederá parte de ese movimiento al adyacente, intentando de esta forma que ambos se muevan al unísono.

Esta transferencia de movimiento lleva implícito una transferencia de calor sin que en ningún momento haya habido transferencia de masa. La energía calorífica va transmitiéndose por contacto de molécula a molécula desde el extremo caliente al frío.

Debe evitarse en todo lo posible que se presente la convección en un destilador solar de agua puesto que se perdería el calor ganado al transmitirse éste de un material a otro.

La fórmula que se usa para calcular la cantidad de calor por conducción es la ley de Fourier:

$$Q/t = (K A) / [(T_1 - T_2)/(\Delta X)]$$

En este caso Q/t es la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo o flujo de calor. Sus unidades son Kcal/s o Joule/s.

1 Kcal son 4,186 joule; 1 joule/s es igual a un W, por lo tanto, el flujo de calor es la potencia transmitida.

Para el caso de un destilador de agua, A es el área de la charola que contiene el agua a destilar. Las unidades del área en la fórmula son m^2 .

T_1 y T_2 son las temperaturas en $^{\circ}C$. Se debe procurar que $T_1 - T_2$ resulten positivos.

ΔX es la longitud o el espesor, su unidad es el metro.

K es la conductibilidad del material. Es un coeficiente que nos indica con qué rapidez se transmite el calor en cada material, por lo tanto es distinto para cada sustancia.

Si K es grande, se trata de un objeto que es buen conductor del calor, por ejemplo, los metales. Las unidades del coeficiente de conductibilidad térmica son

$$K = \text{Kcal/m s } ^{\circ}C$$

c) Radiación.

La radiación térmica es la radiación electromagnética que se produce en la superficie de los cuerpos como consecuencia de la excitación térmica a la que son sometidos. Cualquier cuerpo que esté caliente emite radiación. Mientras más caliente está, más radiación emite. La fórmula que modela el calor emitido por radiación está basada en la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q/(At) = \epsilon\sigma T^4$$

$Q/(A t)$ es la cantidad de calor emitida por unidad de tiempo y por unidad de área. Se mide en calorías/m².

$$Q/t = \text{Joule/s} = W \quad Q = W \quad A = m^2$$

Por lo tanto, se tiene: potencia emitida / área. Epsilon (ϵ) es el coeficiente de emisividad. Su valor se puede encontrar entre cero y uno, nos permite darnos una idea de que tan buen emisor es el cuerpo, mientras más grande es ϵ , mejor emite. Es decir, si el material es buen emisor, entonces, ϵ tiende a uno; mientras que si es mal emisor, ϵ tiende a cero.

- El valor de σ es $1.36 \times 10^{-4} \text{ Kcal}/[(m^2)(s)(K^4)]$ ó $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/[(m^2)(K^4)]$
- T^4 es la temperatura en grados kelvin elevada a la cuarta potencia.

d) Condensación de agua.

El fenómeno de la condensación ocurre cuando el vapor en el aire se condensa y se convierte en agua debido a un cambio en la temperatura. Por ejemplo, a 15°C el aire puede tener 50 gramos por m³ de vapor de agua y a 10°C se alcanza la saturación a 36 gramos por m³. En consecuencia, cuando las condiciones del aire cambian de 15°C con una humedad relativa de 100% a 10°C con la misma humedad, el vapor de agua en la cantidad de $50 - 36 = 14\text{g}/m^3$ no puede ser contenido en el aire en forma de vapor y se condensa en agua. La temperatura a la cual el vapor de agua no se puede quedar en el aire y empieza a condensarse se llama punto de rocío (dew point).

Tabla 1.5 Presión máxima del vapor para diferentes temperaturas.

| °C | Mm de Hg | Kg/cm ² | Pascales |
|-----------|----------|--------------------|----------|
| 0 | 4,58 | 0.0062 | 610.6 |
| 5 | 6.51 | 0.0088 | 867.9 |
| 10 | 8.94 | 0.0121 | 1191.9 |
| 15 | 12.67 | 0.0172 | 1689.2 |
| 20 | 17.50 | 1.0238 | 2333.1 |
| 40 | 55.10 | 0.0749 | 7346.1 |

Fuente: *La permeabilidad al vapor de agua Sp, la permanencia Wp y el factor de resistencia μ.* Armacell Advanced Insulation and Engineered Foams. Información técnica No. 11. www.armacell.com

Analizando la tabla se deduce que si en un compartimiento estancado, con el ambiente saturado y a 10°C, se aumenta su temperatura a 20°C se tendrá una humedad relativa de: $HR = 1191.1/2333.1 = 51\%$.

Resulta importante mencionar el concepto de permeabilidad al vapor de agua, debido a que en el caso de la instalación de un destilador solar, el aislamiento debe aportar una efectiva barrera de vapor.

Se puede decir que la permeabilidad al vapor de agua es la cantidad de vapor (gramos) que pasa por unidad de superficie (m^2) de un material de espesor (cm) por unidad de tiempo (día) cuando entre sus paredes existe una diferencia de presión unitaria (mm Hg).

e) Calor ganado por el agua en función del calor específico a presión constante, masa y diferencia de temperaturas.

Se define calor específico C como la cantidad de calor que hay que proporcionar a un gramo de sustancia para que eleve su temperatura en un grado celcius. En el caso particular del agua el valor de C es una cal/(g C) ó 4,186 J/(kg K).

La cantidad de calor recibido o cedido por un cuerpo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Q = m C (T_f - T_i)$$

Donde m es la masa, C es el calor específico, T_i es la temperatura inicial y T_f la temperatura final

- Si $T_i > T_f$ el cuerpo cede calor $Q < 0$
- Si $T_i < T_f$ el cuerpo recibe calor $Q > 0$

La unidad de medida del calor, la caloría, símbolo cal, se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado Celsius desde 14.5°C a 15.5°C. La unidad de calor en el sistema ingles se llama Unidad térmica británica, (Btu), definida como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una libra de agua en un grado Celsius de 63°F a 64°F. Se elige ese rango de temperatura, porque la cantidad de calor requerida depende levemente de la temperatura; se requiere más calor para elevar la temperatura del agua fría que la del agua a punto de hervir.

f) Absorción de Luz.

Cualquier sustancia o compuesto con color absorbe la luz del color complementario al color que vemos en él, es decir, el color que muestra es el de la luz no absorbida, la cual se ve reflejada o transmitida. Ver Figura 1.16.

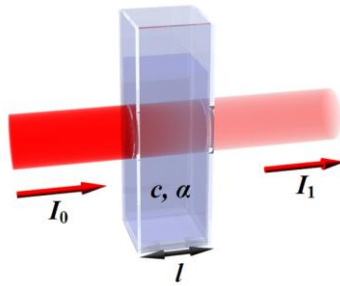


Figura 1.16 Diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una cubeta de tamaño. Ley de Beer-Lambert.

En óptica, la ley de Beer-Lambert, también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado. Esto se puede expresar de distintas maneras:

$$A = \alpha l c$$

$$\frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha l c}$$

$$A = -\log \frac{I_1}{I_0}$$

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

Dónde:

A es la absorbancia

I_0 es la intensidad de la luz incidente

I_1 es la intensidad de la luz una vez que ha atravesado el medio

l es la distancia que la luz atraviesa por el cuerpo

c es la concentración de sustancia absorbente en el medio

α es el coeficiente de absorción o la absorbancia molar de la sustancia

λ es la longitud de onda del haz de luz

k es el coeficiente de extinción

La ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa.

Si conocemos I y α , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida.

Las unidades de c y α dependen del modo en que se exprese la concentración de la sustancia absorbente. Si la sustancia es líquida, se suele expresar como una fracción molar.

Las unidades de α son la inversa de la longitud (por ejemplo cm^{-1}). En el caso de los gases, c puede ser expresada como densidad (la longitud al cubo, por ejemplo cm^{-3}), en cuyo caso α es una sección representativa de la absorción y tiene las unidades en longitud al cuadrado (cm^2 , por ejemplo).

Si la concentración de c está expresada en moles por volumen, α es la absorbencia molar normalmente dada en mol cm^{-2} .

El valor del coeficiente de absorción α varía según los materiales absorbentes y con la longitud de onda para cada material en particular.

1.6.2 Propiedades de los materiales utilizados en la fabricación del destilador.

En este punto se analizarán las propiedades más importantes como la óptica, conductividad, transmitancia y térmicas de los materiales utilizados en la construcción del destilador de agua, así como, estas mismas propiedades de los materiales que pudieron haberse elegido como alternativas, con la finalidad de presentar una justificación válida de los materiales utilizados.

a) Cubierta del destilador solar.

i) Vidrio.

Los vidrios son materiales cerámicos no cristalinos; se denominan como materiales amorfos (desordenados o poco ordenados), inorgánicos, de fusión que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse. El vidrio es una materia inerte compuesta principalmente de silicatos. Es duro y resistente al desgaste, a la corrosión y a la compresión.

Las propiedades ópticas se pueden decir de manera concisa, que una parte de la luz es refractada, una parte es absorbida y otra es transmitida.

Cada una de ellas llevará un porcentaje de la totalidad del rayo de luz que hizo contacto con el vidrio.

El prisma de color que se crea del otro lado del vidrio va del color rojo al color violeta, de los cuales los extremos dan lugar también a las luces no perceptibles por el ojo humano, infrarrojo y la ultravioleta. Es el color de la luz que "sale" del vidrio la cual pasa a través de este, y todos los demás colores del prisma son absorbidos por el vidrio, claro que, son

vidrios muy particulares los cuales logran solamente dejar pasar la luz ultravioleta o la infrarroja, pero gracias a la tecnología actual se han logrado las condiciones precisas para lograr esto.

En cuanto al calor específico, en los vidrios el calor específico es de 0.150 cal/g °C aproximadamente.

La conductividad térmica del vidrio es de aproximadamente 0.002 cal/cm s °C, esta cifra es mucho más baja que la conductividad de los metales, sin embargo, el vidrio tiene una variable que no se aplica a los demás materiales, la radiación causada por el almacenamiento de luz infrarroja y ultravioleta, la cual es muy variable y puede provocar en ocasiones que el vidrio transmita el calor de manera mucho más efectiva que los metales.

En la tierra, la mayor parte de la luz que llega es visible, en un destilador de caseta debido a que representa una réplica del efecto invernadero, la luz entra, y calienta el interior; ahora lo que era luz se transformó en calor, pero como el vidrio es opaco al calor radiante, este queda atrapado; por eso se calienta tanto un automóvil cerrado al sol: la luz entra, se transforma en calor, y no puede salir.

El vapor de agua de la atmósfera, y principalmente el dióxido de carbono (CO₂) actúan como los vidrios de un invernadero. Sin este abrigo nuestra tierra sería tan fría como los -30°C en promedio de Marte, que por casi carecer de efecto invernadero sufre una amplitud térmica de 50°C.

Por otro lado, si abrigáramos demasiado la Tierra, podríamos llegar a sufrir los 425°C de Venus, producidos principalmente por su efecto de invernadero más que por su proximidad al sol.

El vidrio que se utiliza como cubierta es siempre el vidrio impreso, el cual presenta una óptima transmisión óptica y térmica. Es un material no combustible, resistente a la radiación ultravioleta y a la polución, manteniendo sus propiedades iniciales a lo largo de su vida útil.

El principal problema del vidrio es su vulnerabilidad a los impactos, zonas con altas posibilidades de granizo desaconsejan su uso, este hecho es despreciable debido a la zona geográfica en la que estamos trabajando con el destilador, así como la altura o elevación del suelo en la que se encuentra ubicado. Requiere un mantenimiento regular de limpieza y sellado.

El vidrio apropiado utilizado en destiladores de caseta tiene un espesor de tres a cuatro mm, con una densidad de 2.400 Kg/m³.

ii) Polimetacrilato de metilo (PMM)

Se conoce comercialmente como vidrio acrílico. Es un material ligero, con una densidad de 1.180 kg/m^3 , que presenta buena resistencia mecánica y estabilidad. Entre sus ventajas se encuentra la resistencia a la rotura, siete veces superior a la del vidrio a igualdad de espesores así como su extrema ligereza.

Otro punto importante es que gracias a su coeficiente de conductividad térmica impide el enfriamiento. En cuanto a sus inconvenientes, el principal de ellos es su elevado costo, por lo que en este caso, desde el primer momento se descartó su utilización.

iii) Polietileno (PE).

Es un derivado de la hulla y del petróleo, obtenido mediante la polimerización del etileno, en su fabricación se utilizan el proceso de alta presión y la catálisis de radicales libres mediante peróxidos.

Es el plástico flexible más empleado actualmente para forzado de cultivos en invernaderos, túneles y acolchados. Esto se debe principalmente a su bajo precio, a sus buenas propiedades mecánicas, y a la facilidad para incorporar aditivos que mejoran sus prestaciones.

El PE junto al polipropileno (PP) y al PVC, son los termoplásticos de más consumo.

Atendiendo a su densidad los PE se clasifican en:

- Baja densidad: $< 930 \text{ kg/m}^3$.
- Media densidad: $930\text{-}940 \text{ kg/m}^3$.
- Alta densidad: $> 940 \text{ kg/m}^3$.

Tanto para el cerramiento de invernaderos como para los destiladores solares de caseta, se utiliza sólo el de baja densidad (baja cristalinidad) y alto peso molecular (bajo índice de fluidez). Una de las características del PE es que su alargamiento en el punto de rotura es cercano al 500%.

El PE es el material plástico que menos densidad tiene; es decir, es el que menos pesa por unidad de superficie a igualdad de grosor y no se oscurece con el paso del tiempo.

El PE se degrada por la radiación ultravioleta y el oxígeno, por lo que la exposición permanente a la intemperie provoca su rotura al perder sus propiedades mecánicas, esta propiedad fue definitiva y contundente durante la selección puesto que el destilador permanentemente se ubicaría a la intemperie y obviamente, de frente al sol, en la Plataforma del CIE.

Cabe mencionar que existen otros tipos de PE como el de larga duración (de dos a tres años) y el normal térmico de larga duración, que logra temperaturas de 2 a 3°C más elevadas que las registradas por el PE normal, pero definitivamente, se eleva por mucho el costo de la instalación en nuestro destilador solar.

b) Colector solar y Base del destilador.

El colector consiste en una charola, amplia, extensa y poco profunda, de color negro en su cara superior, que se coloca en forma horizontal. Dentro de esta charola se coloca una pequeña lámina de agua, la cual se calienta directamente por contacto con el fondo de la charola negra.

El material del que se construya la charola colectora no es especialmente importante, desde el punto de vista térmico, pero sí desde otros puntos de vista. Por ejemplo, la lámina de hierro puede tener problemas de corrosión, aumentado precisamente por la presencia de las sales que se desea remover.

En cuanto a la base del destilador, consiste en una charola que sostiene tanto al colector solar como la cubierta en nuestro caso, de doble caída.

Ambos casos podrían construirse del mismo material, que consiste en el que se describe a continuación:

i) Vidrio.

Se puede mencionar, además de las características anteriores, que son aisladores ya que ellos no tienen gran número de electrones libres. Tienen más bajas conductividades que los cerámicos cristalinos. La conductividad térmica del vidrio disminuye cuando aumenta la temperatura.

ii) Lámina galvanizada.

La lámina galvanizada es un metal como el hierro o el acero que, previo tratamiento, es cubierta por una capa de zinc que impide su corrosión y aunque tuviera "raspones", debido a sus características químicas "rechazará" la oxidación del material que protege, por otra parte, es fácil la limpieza, por lo que, sobre todo debido a estas propiedades, es muy factible utilizar este tipo de material como colector de agua.

Metodología empleada en la Tesis

En este trabajo se está proponiendo un nuevo prototipo para llevar a cabo la destilación solar de agua, basado en las tecnologías ya utilizadas por varios autores, pero evaluando el punto de vista energético del destilador. Se definió una figura de mérito, se implementaron cambios e innovaciones con las cuales se logró mejorar este parámetro, con el objeto de caracterizarlos y tener una herramienta de dimensionamiento que permita diseñar a futuro escalamientos de los prototipos propuestos.

- I. Se estableció un período de intercambio de información con el asesor de Tesis, con la finalidad de reforzar conocimientos, no perder de vista la dirección a seguir de acuerdo a los objetivos de la tesis y una orientación en general para la estructura de la misma en cuanto a contenidos; asimismo, se calendarizaron períodos futuros para reuniones con el objetivo de llevar a cabo revisiones y avances del proyecto, analizando nuevos datos y bibliografía reciente.
- II. Se consolidó la búsqueda de información sobre el estado del arte actual sobre los destiladores solares y se seleccionó aquellos que presentaron el mejor rendimiento.
- III. Se diseñó y construyó un sistema de destilación mediante un destilador solar de caseta de doble caída, al que se le implementaron cuatro diferentes modificaciones, mismos que se observaron en campo para evaluar el rendimiento en condiciones reales.
- IV. Se diseñó un sistema de medición de datos, mediante una serie de sensores conectados del Data Logger (sistema de adquisición de datos) hacia el destilador solar de agua, estos sensores se ubicaron estratégicamente con la finalidad de proporcionar las siguientes referencias:
 - a) Temperaturas: Se ubicaron cinco sensores en las siguientes posiciones: exterior del vidrio, sobre la pared del mismo (cubierta del destilador); exterior de la charola de aluminio blanca, exterior de charola negra (colector), base del colector dentro del agua y dentro del colector flotando en el agua.
 - b) Condensación, dos sensores: interior del vidrio, sobre la pared de éste y otro, sostenido en la pared interior, al aire libre.
 - c) Temperatura ambiente, un octavo sensor se ubicó al aire libre en el exterior del destilador solar y sostenido de las paredes del mismo (cubierta).
- V. Se realizó un estudio experimental para obtener la tasa de producción de agua destilada en función de la irradiancia. Se determinó la tasa de producción en litros por hora en función del recurso solar medido. Para esto, se instrumentó el prototipo con el objeto de medir las variables climatológicas como lo son temperatura ambiente sobre la superficie del colector, radiación solar incidente dentro del destilador, temperatura exterior de la envolvente, temperatura interior de la envolvente, temperatura ambiente dentro del destilador, temperatura de la película del agua y temperatura del absorbedor (ver detalle en punto IV).

- VI. Posteriormente, se llevaron a cabo diferentes modificaciones al destilador con la intención de obtener en cada una, mayor cantidad de agua purificada, buscando incrementar la productividad del destilador, es decir, definir la alternativa óptima que maximice el rendimiento del prototipo.
- VII. Se analizó el balance energético global para la optimización anterior.
- VIII. Se realizó un análisis técnico y económico en función de los resultados obtenidos para determinar la viabilidad de la implementación de tal prototipo.

Descripción del sistema de adquisición de datos (data logger).

El nombre de sistema de adquisición de datos tiene que ver con la analogía de medir y almacenar en el propio sistema, este sistema es totalmente autónomo. En caso de requerirse alimentarlo por una fuente eléctrica o mediante algún módulo de celdas fotovoltaicas, requiere entre diez y veinte watt para cargar la batería.

El sistema de adquisición de datos puede medir voltajes analógicos: doce voltajes unipolares (positivos), con cinco rangos de voltaje programables: de 0 a 2.5 volts; o bien seis bipolares (tanto positivos como negativos), en el rango de +-2.5 volts, con una resolución de 12 bit. . Ver figura 1.17.

Para cualquier sustancia u objeto físico que se pretenda medir debe ser a través de sensores y se transfiere a voltaje.

Se tiene una capacidad de almacenar alrededor de dos megabytes de información. El resultado que arroja tiene que ver con el día del año que se esté midiendo; entonces, se despliega la información en el siguiente orden y en columnas: día, hora y demás variables de acuerdo al número de sensores que se estén analizando.

Se cuenta además con un software para programar y extraer datos a través de la interfase serial, que se conecta con la computadora.

Entre las ventajas del sistema principalmente, se pueden seleccionar diferentes rangos de medición desde 2.5, 7.5, 25 250 y 2,500 microvoltios, sin ajustar, sólo seleccionando el rango deseado en la computadora. Como se puede observar, su función principal es disminuir el tiempo de medición. La marca del Data Logger utilizado es Campbell Scientific, Inc; modelo CR-10.

Como se mencionó anteriormente, el data logger tiene cinco rangos de medición:

- 1.- 2.5 mv con resolución de 0.66 mv
- 2.- 7.5 mv con resolución de 2 mv
- 3.- 25 mv con resolución de 6.66 mv
- 4.- 250 mv con resolución de 66.6 mv
- 5.- 2500 mv con resolución de 666 mv

El grado de error de la resolución en los sensores LM335 es 0.066°C .

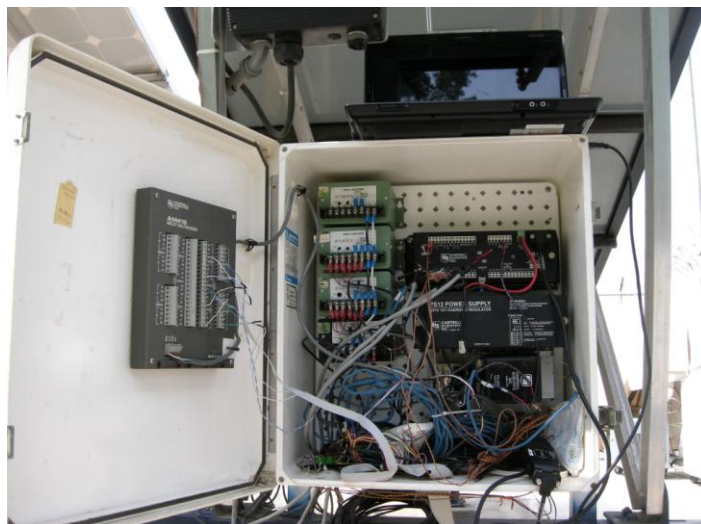


Figura 1.17 Data Loguer. CIE-UNAM.

CAPÍTULO SEGUNDO

2.1 Introducción.

Se diseñó y construyó un destilador solar para desalación de agua salobre o salada; partiendo de un mismo diseño geométrico se encontraron mejoras que ayuden a eficientar el rendimiento de condensación al introducir paredes térmicas que propicien un sumidero de calor.

El destilador solar analizado así como los tres prototipos a los que se les implementaron diferentes innovaciones funcionan bajo el mismo principio y sistema, básicamente con el mismo material y ensamblado, la diferencia radica precisamente, en los diferentes aditamentos y mejoras que se implementaron a cada uno en función de los resultados que día a día se iban obteniendo.

Las características geométricas del destilador solar tipo caseta empleado en este trabajo de tesis son, la base es de 0.23 metros cuadrados; el techo está formado por dos rectángulos de 30x45 cm de vidrio de 3 mm de espesor y las paredes son dos triángulos de 40 cm de base y 35 cm de altura de vidrio de 3 mm de espesor.

Las uniones de vidrio se hicieron con silicón. Esta estructura de vidrio está unida a la base por gravedad utilizando un plástico de neopreno como sello. Dentro se coloca una base absorbedora que contendrá la solución salobre, la cual está hecha de lámina galvanizada pintada de color negro y tiene una capacidad de hasta 4 l.

Una lámina de unicel de 12 mm de espesor separa la base absorbedora de la base contenedora del destilado.

En la Figura 2.1 se puede apreciar el ensamble y armado básico del destilador solar de caseta de doble cascada, así como las dimensiones del mismo. El ángulo de inclinación de la caseta se ubicó en 6°C, misma que fue medida con un inclinómetro.

Cabe mencionar que todos los aparatos de medición fueron proporcionados por el Centro de Investigación en Energía de la UNAM.

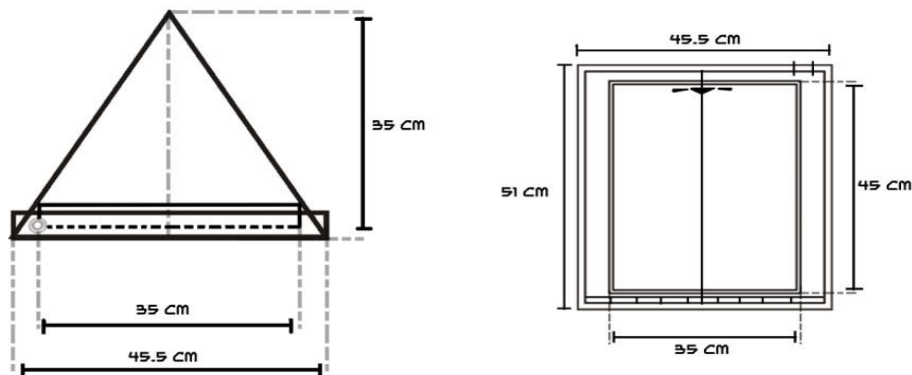


Figura 2.1 Medidas básicas del destilador solar de caseta de dos vertientes utilizadas en los modelos analizados en este trabajo de Tesis. Elaboración propia, 2008.

2.2 Cómo funciona el destilador de caseta de dos vertientes.

El principio de funcionamiento del destilador solar es muy sencillo, se agrega agua (salobre o residual) en la bandeja de forma trapezoidal color negro, de modo que se forme una delgada lámina de agua y se tapa con un vidrio liso transparente, con dos vertientes, y estas vertientes, selladas con una goma de plástico, ubicada entre el filo de éstas y la charola blanca.

La radiación solar pasa a través del vidrio y calienta el agua; debido a que el fondo de nuestra bandeja se pinta de color negro, el agua alcanza más altas temperaturas que el vidrio, lo que origina que el vapor de agua del aire interior sea elevado y al tener contacto este aire cargado de vapor de agua con la superficie del vidrio, que como ya se mencionó anteriormente, está más fría, se produce la condensación del agua; ésta se evapora en la superficie del vidrio, a su vez, la pared de vidrio enfriado por el aire exterior, favorece su condensación (como ya se mencionó anteriormente).

Finalmente, el agua ya en forma de gotas, se desliza por ambos planos inclinados y se dirige, debido al desnivel que se le ha dado a la charola recolectora del agua producto, hasta el orificio que contiene la misma y de esta forma, se hace llegar el agua limpia, prácticamente libre de sales o de residuos peligrosos (no volátiles), hasta el recipiente para su almacenamiento.

El efecto "invernadero" es el que logra que se eleve la temperatura del interior del destilador, logrando los rangos que se especifican en la parte de Resultados Obtenidos, dentro del Capítulo Tercero del presente trabajo.

2.3 Condiciones necesarias para un buen funcionamiento del destilador solar.

Se requiere de una lámina de agua de aproximadamente tres a cuatro cm de espesor, bajo condiciones de alta irradiancia, alrededor de $1,000 \text{ w/m}^2$.

En cuanto a las temperaturas del aire (ambiente) lo más frío posible, las que se obtuvieron estuvieron en el rango de entre 36 a 39°C , vientos lo más altos posible, con la finalidad de que mientras el sol calienta el agua, el vidrio se enfríe, pero que no se dañe mecánicamente el destilador.

La superficie captadora debe ser lo más absorbente de luz solar posible, el vidrio debe ser lo más transparente posible para que la radiación se vaya al agua.

Un destilador solar sencillo y fácil de construir considera tres componentes principales, una cubierta que normalmente es de vidrio y es utilizada como superficie condensadora, un cuerpo de agua que al calentarse se evapora y una superficie absorbente opaca utilizada como colector de energía que es el componente que aporta la mayor cantidad de energía al sistema.

La Figura 2.2, muestra un diagrama esquemático de un destilador solar de caseta de dos vertientes y sus componentes.

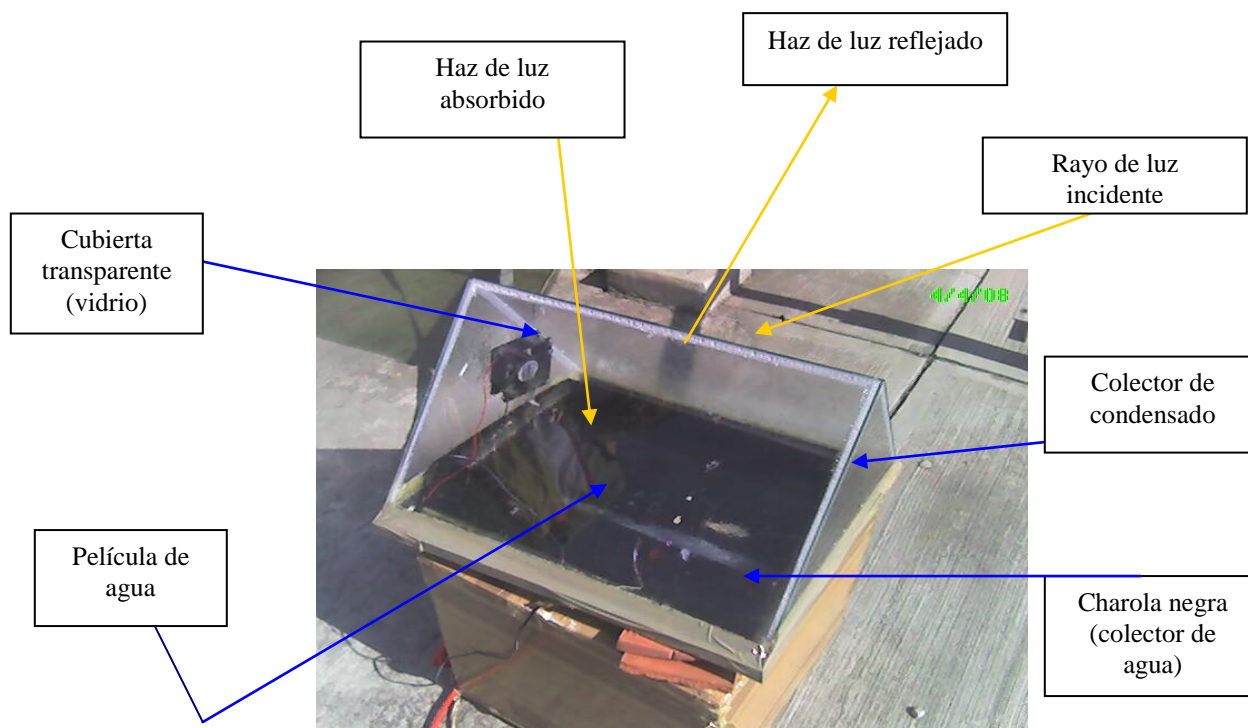


Figura 2.2 Destilador solar caseta de dos vertientes y sus componentes.

2.4 Planteamiento de la Figura de Mérito

Para fines de rendimiento energético y para poder usar éste número en problemas de dimensionamiento de este tipo de sistemas, se definió una figura de mérito (F) a maximizar, la cual está dada por el volumen destilado (V) por unidad de energía introducida al sistema (E) y por unidad de área (A). Así la figura de mérito viene dada por:

$$F = \frac{V}{E}$$

Una manera más práctica de calcular la figura de mérito F, es dividiendo el volumen de destilado obtenido entre el número de horas pico (hp, 1hp=1,000 wh/m²) por el área más otras formas de energía introducidas al sistema (Ei), o sea:

$$F = \frac{V}{(hp A + Ei)}$$

Las unidades de F serán: l/(Kw-h).

Resumiendo, la figura de mérito está correlacionando los litros destilados en función del área que tiene el destilador, esta figura de mérito es la representación de toda la integral de valores obtenidas en un período en función del área y de la irradiancia que hubo en ese día; no se trata de eventos estadísticos, sino de valores puntuales que al ser integrados nos proporcionan un área resultante.

El número de días medidos en cada modelo puede ser variable, ya que lo que estamos comparando son mediciones constantes a lo largo del día y están directamente correlacionadas con la irradiancia recibida. Por lo que no es indispensable haber tomado lecturas la misma cantidad de días en cada modelo.

Como se mencionó anteriormente, para realizar la caracterización del destilador solar se utilizó un sistema de adquisición de datos autónomo (data logger) campbell 2110 el cual tiene 24 canales de medición en 3 rangos de voltaje manuales con una resolución de 12 bit. Se midió irradiancia incidente con un piranómetro marca LI-COR, modelo LI-200SA cuya constante de calibración es 95 μ A por 1000 w/m² (utilizando un adaptador de voltaje, de la marca LI-COR), se obtuvo una constante de 13.96 mV por 1000 w/m², las temperaturas del agua, de la pared interior del vidrio, de la pared exterior del vidrio, del aire en el interior y la ambiente se midieron utilizando sensores de estado sólido LM335.

El agua destilada se medía cada día con un medidor volumétrico de manera manual, considerando un margen de error del 5%, de acuerdo a datos del fabricante, es decir, 0.25 mm de precisión.

En las Figuras 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7, se puede observar la variabilidad de una muestra representativa de los datos obtenidos en un día claro con irradiancias máximas de 1,090 w/m², como ejemplo del comportamiento del destilador solar durante todo el proceso del

desarrollo técnico del presente trabajo de tesis. En este caso, el día que se está utilizando para ejemplificar es el sábado 8 de marzo; se describen a continuación los datos obtenidos más relevantes:

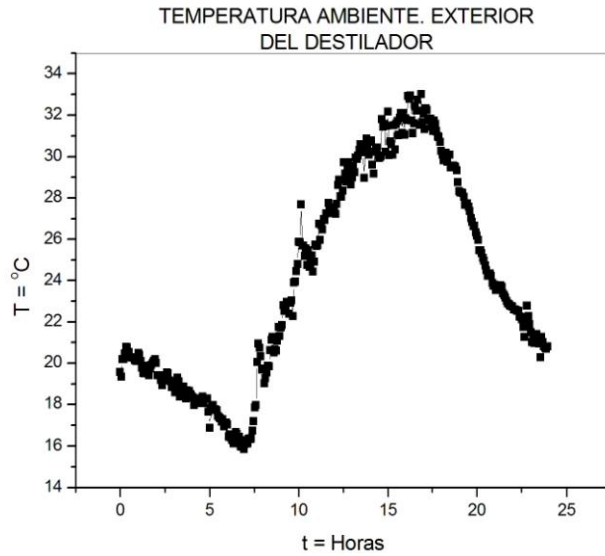


Figura 2.3 Temperatura del exterior del destilador el día 8 de marzo del 2008. Elaboración propia, 2008.

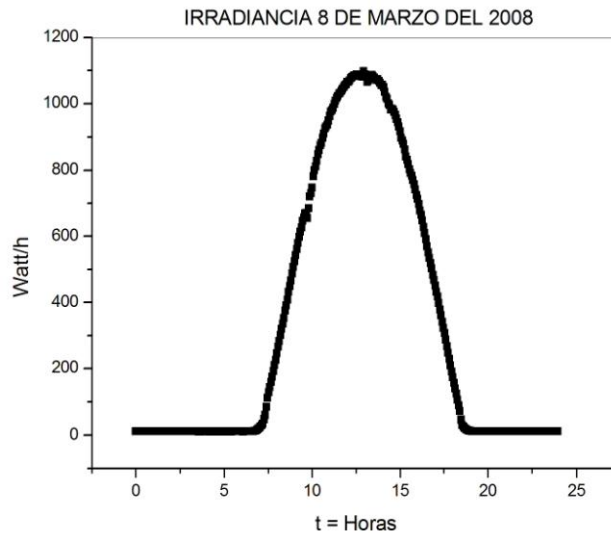


Figura 2.4 Irradiancia de un día completo, en este caso, 8 de marzo del 2008. Elaboración propia, 2008.

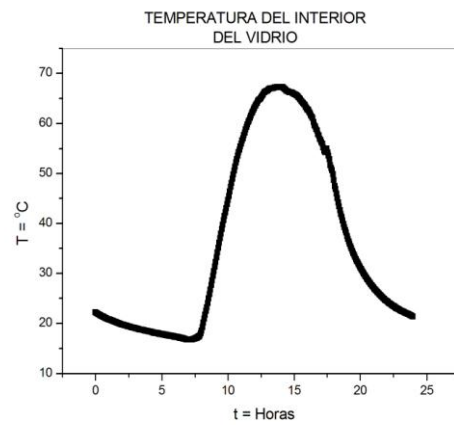


Figura 2.5 Temperatura en el interior del vidrio del destilador solar. 8 de marzo del 2008. Elaboración propia, 2008.

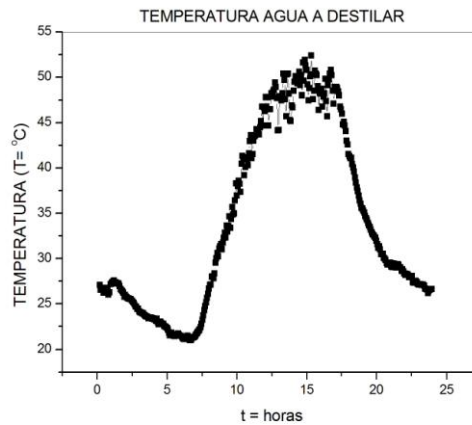


Figura 2.6 Temperatura del agua dentro del colector, día 8 de marzo del 2008. Elaboración propia, 2008.

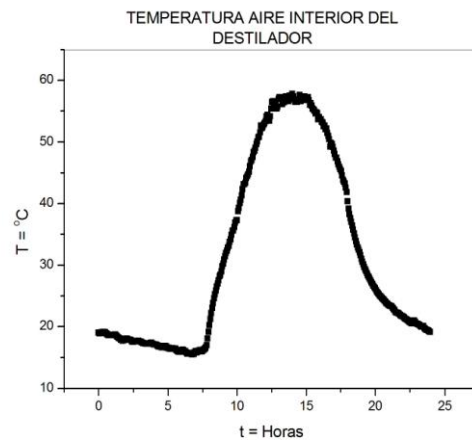


Figura 2.7 Temperatura del aire interior del destilador solar del 8 de marzo del 2008. Elaboración propia.

2.5 Primer Prototipo

El primer prototipo utilizado para obtener datos fue el destilador solar de caseta de dos vertientes con convección natural; este prototipo se puede observar en la Figura 2.3.

Como ya se mencionó en el primer capítulo, en la parte en la que se describe y define la convección natural, se permitió que el movimiento del agua a destilar y cambio de estado, se diera por causas naturales, es decir, al calentarse el agua, se manifestara con la subida del fluido caliente y el descenso del fluido líquido en todo el sistema.

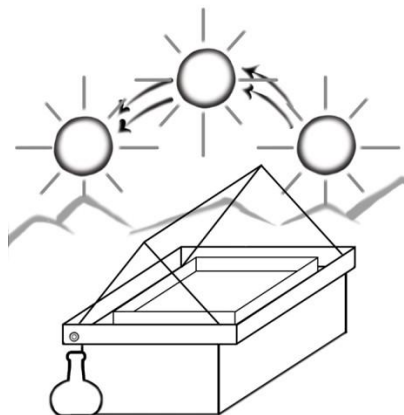


Figura 2.8 Destilador solar de caseta de dos vertientes, convección natural. Elaboración propia, 2008.

2.5.1 Secuencia y datos obtenidos en la primera fase. Convección natural.

- I. Viernes 28 de febrero: se inician las mediciones en seco a las 15:44.
- II. Sábado primero, domingo dos y lunes tres de marzo: continúan las mediciones en seco, con la finalidad de observar los primeros datos que arroja el sistema.
- III. Lunes tres de marzo, 20:00 horas: se instala el destilador con agua, se colocan tres litros de agua en la charola negra.
- IV. Martes cuatro y miércoles cinco de marzo: se mide continuamente estos dos días con agua, se recolectan 1.200 litros de agua destilada durante estos dos días.

- V. Miércoles 5 de marzo, 20:00 horas: se agregaron dos litros de agua a destilar en la charola negra.
- VI. Jueves seis de marzo, 20:00 hrs: se recolectaron 0.650 litros.
- VII. Viernes 7 de marzo 20:00 horas: se recolectaron 0.750 litros de agua destilada. Se colocaron 1.5 litros más en la charola negra.
- VIII. Sábado ocho y domingo nueve de marzo, 20:00 hrs: se recolectaron 1.225 litros de agua.
- IX. Lunes diez, 20:00 hrs: se recolectaron 0.550 litros; se colocaron dos litros en la charola negra.
- X. Martes 11 y miércoles 12, se recolectaron 1.150 litros.
- XI. Jueves 13, 20:00 horas: se destilaron 0.550 litros. No se agregó más agua en la charola negra.
- XII. Viernes 14, se destilaron 0.600 litros. Se llenó la charola negra llegando aproximadamente a cuatro litros, se dejó destilando por ocho días, se destiló toda el agua en la charola negra y se llenó por completo el contenedor de agua destilada (84 litros). Se eliminó esta observación por no tener claramente el dato del día y hora exacta en el que se destilaron los cuatro litros de agua.
- XIII. Viernes 21 de marzo, se agregaron a la charola negra cuatro litros de agua a destilar, se dejó destilar durante cinco días.
- XIV. Jueves 27 de marzo, exactamente se recolectaron los cuatro litros originales en seis días.

Una vez que se obtuvieron temperaturas de cada sensor, así como la irradiancia, durante los días observados, se procedió a integrar el área bajo la curva de cada día, y graficar, obteniendo una figura de mérito, en la que se involucra además, el área de nuestro destilador, logrando obtener la eficiencia del destilador solar (Figura 2.9).

En la Tabla 2.1, se muestran los datos obtenidos que integran la figura de mérito para este primer modelo analizado.

Tabla 2.1 Valores obtenidos durante las observaciones diarias que originan la figura de mérito del destilador solar de convección normal.

| DÍAS | DATOS OBTENIDOS | UNIDADES |
|------|-----------------|----------|
| 1 | 0.363 | l/Kw-h |
| 2 | 0.335 | l/Kw-h |
| 3 | 0.387 | l/Kw-h |
| 4 | 0.373 | l/Kw-h |
| 5 | 0.311 | l/Kw-h |
| 6 | 0.350 | l/Kw-h |
| 7 | 0.311 | l/Kw-h |
| 8 | 0.368 | l/Kw-h |

Elaboración propia, 2008.

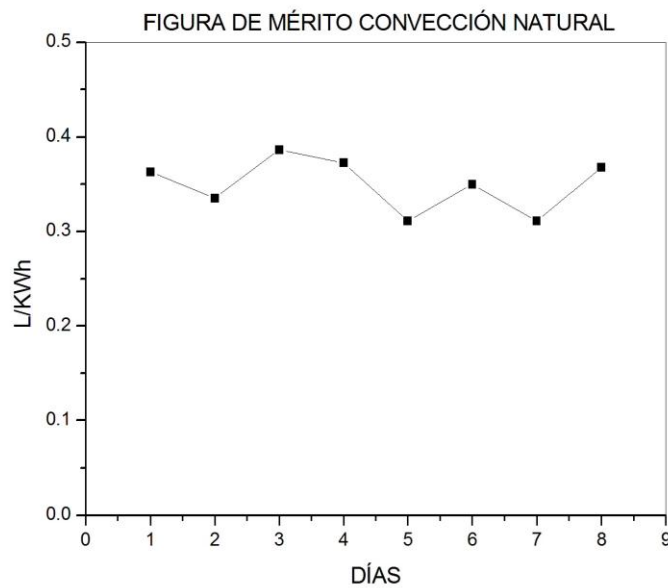


Figura 2.9 Figura de mérito para el destilador solar con convección natural. Definida por l/Kw-h Datos de los días martes cuatro de marzo al 22 de marzo del 2008. Elaboración propia, 2008.

2.5.2 Secuencia y datos obtenidos en la segunda fase. Convección forzada: Un ventilador.

En esta fase del proyecto, se midió con un sensor, ubicado dentro de la charola negra, con la finalidad de monitorear la temperatura del agua a destilar.

El cambio más importante que se hizo al destilador solar fue adaptar un motor de corriente directa sin carbonos de 2.6 watt, el cual se colocó dentro del destilador en un extremo, como se observa en la Figura 2.10. La razón por la que se agregó este ventilador es con la finalidad de conducir el aire húmedo hacia la región de condensación, en lugar de que el vapor se mueva de manera natural y se condense en el vidrio, el ventilador va a mover el vapor de una manera forzada hacia una superficie de condensación, mejorando ésta última y obteniendo más litros de agua purificada.

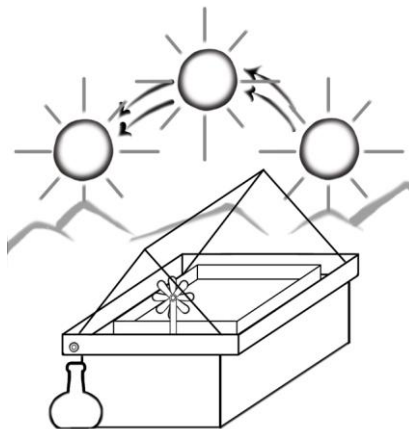


Figura 2.10 Destilador solar convección forzada con un ventilador.

Elaboración propia, 2008.

- I. Miércoles dos de abril: se inician mediciones. Se colocaron en la charola negra dos litros de agua a destilar.
- II. Jueves tres de abril, se recolectaron 0.900 litros de agua destilada.
- III. Viernes cuatro de abril: Se recolectaron 0.600 litros, se perdieron 0.500 litros, por error no se selló la perforación de sensores en la base de la charola de lámina galvanizada (base del destilador solar), por lo tanto se anuló esta observación. Se colocaron dos litros en la charola negra de agua a destilar para el fin de semana.
- IV. Sábado cinco y domingo seis de abril: se recolectaron 1.700 litros de agua destilada.
- V. Lunes siete de abril: 10:12 am, se cambió al horario de verano; se colocan cuatro litros; este mismo día a las 8 de la noche se recolectaron 0.900 litros.

- VI. Día martes ocho de abril: 8:00 pm, se recolectaron 0.950 litros.
- VII. Miércoles nueve de abril, última medición con un ventilador; recolectamos 1.0 litros de agua destilada.
- VIII. Jueves diez de abril se desconectó el destilador a las 10:12 am.

Al igual que en el destilador solar de convección natural, se procedió a integrar el área bajo la curva de la irradiancia para obtener así, considerando el área del destilador y los litros obtenidos los días observados, la gráfica de la figura de mérito de este segundo prototipo, al que se le adaptó un ventilador, misma que se muestra en la Figura 2.11. Asimismo, se muestran en la Tabla 2.2, los datos que originan esta gráfica.

Tabla 2.2 Valores que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador.

| DÍAS | DATOS OBTENIDOS | UNIDADES |
|------|-----------------|----------|
| 1 | 0.517 | l/Kw-h |
| 2 | 0.497 | l/Kw-h |
| 3 | 0.546 | l/Kw-h |
| 4 | 0.563 | l/Kw-h |
| 5 | 0.555 | l/Kw-h |

Elaboración propia, 2008.

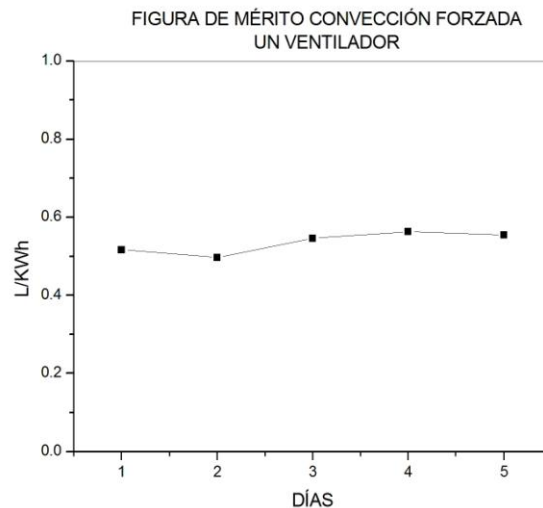


Figura 2.11 Figura de mérito para el destilador solar con convección forzada: un ventilador. Definida por l/Kw-h. Datos obtenidos los días jueves 3, viernes 4, sábado 5, domingo 6, lunes 7, y martes 8 de abril del 2008. Elaboración propia, 2008.

2.5.3 Secuencia y datos obtenidos en la tercera fase. Convección forzada: Un ventilador, un disipador.

Se utilizaron dos sensores, uno ubicado en el vidrio exterior y un segundo sensor ubicado en el agua a destilar, así como un disipador de uso en dispositivos de electrónica de potencia, ubicado en una pared lateral, dentro del destilador y fuera de la charola negra que contiene el agua a destilar, asimismo, se conservó el ventilador de 2.6 watt, ubicado frente al disipador, con la finalidad de incrementar la superficie de condensación, con lo que se logra que el metal al tener una temperatura más baja que el vidrio incremente la condensación, además de que la conductividad térmica del metal es mejor que la del vidrio. Ver Figura 2.12.

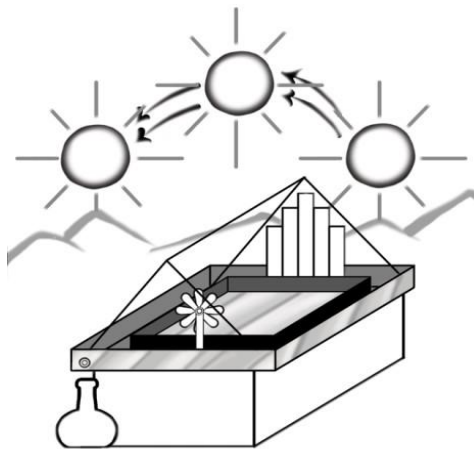


Figura 2.12 Destilador solar de agua de convección forzada: Un ventilador y un disipador. Elaboración propia, 2008.

- I. Se inician mediciones a partir del día jueves primero de mayo a las 20:00 hrs. Se colocan cuatro litros de agua a destilar en la charola negra.
- II. El día viernes dos de mayo se recolectaron 1.050 litros de agua.
- III. El día sábado tres de mayo se destilaron 1.100 litros de agua, no se colocó más agua en charola negra; aproximadamente contiene en estos momentos 1.850 litros.
- IV. Domingo cuatro de mayo se destilaron 1.100 litros; se agregaron a la charola negra tres litros de agua a destilar.
- V. Lunes cinco de mayo, se recolectaron 0.950 litros.
- VI. Martes seis y miércoles siete de mayo, se obtuvieron 1.800 litros de agua destilada.
- VII. Jueves ocho, se obtuvo 0.900 litros de agua destilada.

VIII. Se desmontó el destilador el día viernes nueve de mayo a las 11:00 am.

En la Figura 2.13 se puede observar la irradiancia que se presentó durante los días observados mientras se trabajaba con este tipo de destilador.

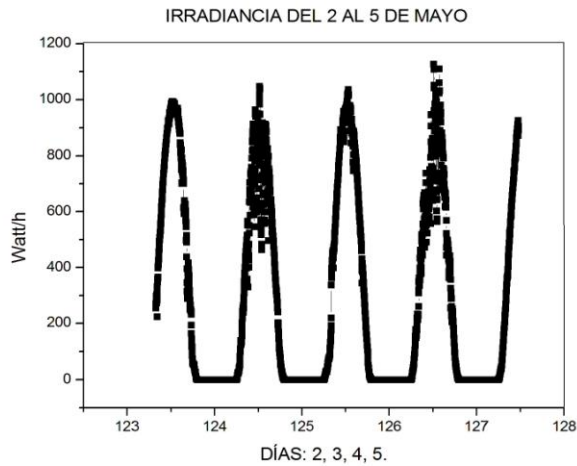


Figura 2.13 Irradiancias obtenidas los días 2, 3 4 y 5 de mayo del 2008. Elaboración propia, 2008.

Con la anterior información, se obtuvo la siguiente figura de mérito, mostrada en la Figura 2.14.

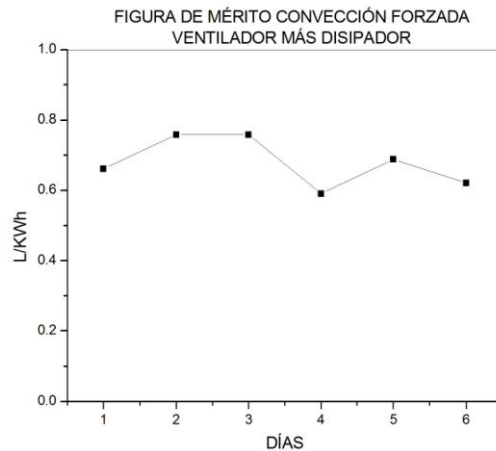


Figura 2.14 Figura de mérito para el destilador solar con un ventilador y un disipador. Definida por l/Kw-h. Datos del día viernes 2 al jueves 8 de mayo del 2008. Elaboración propia, 2008.

En la Tabla 2.3, se pueden observar los datos obtenidos de esta figura de mérito.

Tabla 2.3 Valores obtenidos durante las observaciones diarias que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador y un dissipador.

| DÍAS | DATOS OBTENIDOS | UNIDADES |
|--------------|-----------------|----------|
| 1 | 0.662204 | l/Kw-h |
| 2 | 0.75938 | l/Kw-h |
| 3 | 0.758853 | l/Kw-h |
| 4 | 0.591079 | l/Kw-h |
| 5 y 6 | 0.688848 | l/Kw-h |
| 7 | 0.621311 | l/Kw-h |

Elaboración propia, 2008.

Las irradiancias máximas medidas fueron hasta de 1,040 w/h con temperaturas del agua a destilar máximas de 46°C; la mayor cantidad de agua recolectada durante este período experimental fue de 1.7 l/día.

2.5.4 Secuencia y datos obtenidos en la cuarta fase. Convección forzada: Un ventilador y pared de lámina de aluminio.

Última fase de observaciones en la que se realizaron algunos cambios importantes a los modelos anteriores, principalmente:

- a) Se sustituyó una de las paredes de vidrio angostas por una pared de aluminio, la cual permaneció cubierta para lograr que se mantuviera a una temperatura diferente (más fría) que el resto del destilador, esta pared metálica se ubicó justo en frente del ventilador buscando que en cuanto se llevara a cabo la evaporación, ésta sea arrastrada hacia dicha pared.

Por otra parte, se procuró que la pared metálica tuviera una orientación en la que no recibiera el sol directamente con la finalidad de que se obtuviera una diferencial más acentuada de temperatura entre la pared metálica y el vidrio que conforma la caseta y ésta a su vez, se mantuviera más fría que el agua, con la finalidad de acelerar la condensación del vapor y así obtener más agua destilada al final del día.

- b) Se mantuvo el mismo ventilador y en la misma posición que en el modelo anterior;
- c) No se colocaron sensores. Ver Figura 2.15

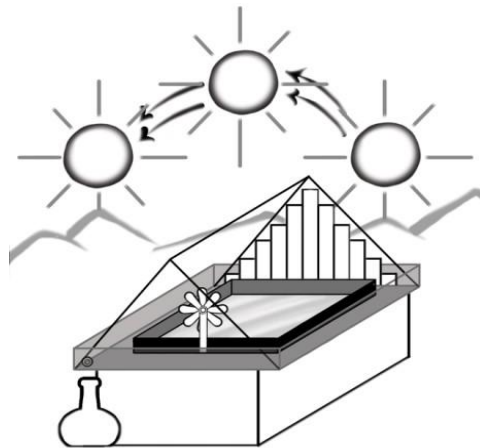


Figura 2.15 Destilador solar de agua, convección forzada: Pared metálica y un ventilador. Elaboración propia, 2008.

- I. Se inician mediciones a partir del día viernes nueve de mayo. Se preparó el destilador con los cambios antes mencionados y se vertieron en la charola negra cuatro litros de agua a destilar.
- II. Sábado diez de mayo, se recolectaron 0.950 litros de agua destilada.
- III. Domingo once de mayo, se recolectaron 0.850 litros.
- IV. Lunes doce de mayo, se recogieron 0.950 litros, de agua destilada, se agregaron en la charola negra tres litros de agua para su destilación.
- V. Martes 13 de mayo, se recolectaron 0.950 litros, no se agregó más agua para destilar.

Se suspenden las mediciones por encontrar datos muy parecidos en todos los días observados. Se desconectó el destilador el miércoles 14 de mayo a las 10:00 de la mañana, con lo cual se da por concluida la fase experimental del presente trabajo.

En la Tabla 2.4 se muestran los datos que obtenidos que dan origen a la figura de mérito obtenida con el destilador solar analizado en esta fase.

Tabla 2.4 Valores obtenidos durante las observaciones diarias que originan la figura de mérito del destilador solar de convección forzada, adaptando un ventilador y una pared metálica.

| DÍAS | DATOS OBTENIDOS | UNIDADES |
|------|-----------------|----------|
| 1 | 0.599 | l/Kw-h |
| 2 | 0.587 | l/Kw-h |
| 3 | 0.655 | l/Kw-h |
| 4 | 0.591 | l/Kw-h |

Elaboración propia, 2008.

Al observar la gráfica representada en la Figura 2.16, se podrá analizar la figura de mérito, basada como en los casos anteriores, en los litros destilados en función de la irradiancia y considerando el área de nuestro destilador.

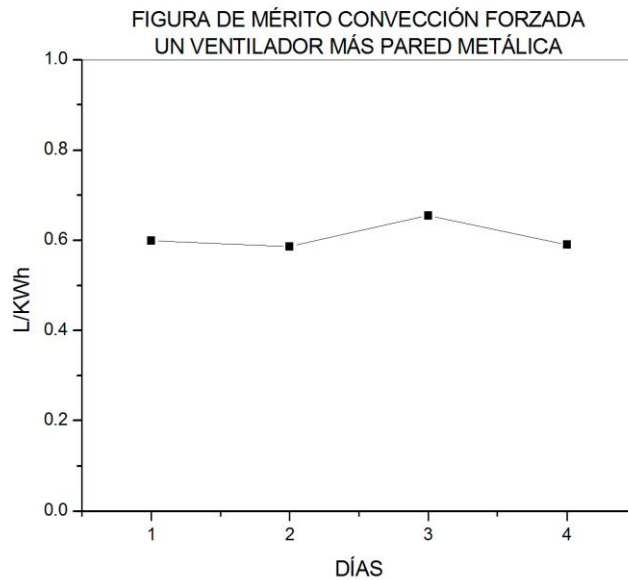


Figura 2.16 Figura de mérito para el cuarto modelo analizado.
Definida por l/Kw-h. Datos del día sábado 9 al viernes 13 de mayo del 2008. Elaboración propia, 2008.

Como se puede observar, el hecho de colocar una pared de aluminio o un disipador de 230 cm² usado en dispositivos de electrónica de potencia, da resultados semejantes a los obtenidos al prototipo número tres.

2.6 Conclusiones.

- I. La figura de mérito obtenida con el destilador de convección natural es 0.36 l/(Kw-h), con temperaturas máxima de 43°C del agua a destilar y una densidad de energía promedio recibida en un día de 7.44 Kw-h/m², se recolectaron en promedio 0.628 litros de agua. Se obtuvieron mediciones de irradiancias máximas de hasta 1,096 watt.
- II. Introduciendo sólo el 5% más de energía en forma eléctrica al sistema, se obtuvo una mejora en la figura de mérito del 50%, llegando a 0.54 l/(Kw-h) y un promedio de 0.908 litros de agua destilada diaria, con irradiancias máximas de 1,044 watt y temperaturas máximas de 46°C del agua a destilar.
- III. Al introducir el 5% más de energía en forma eléctrica y adaptar un disipador, se obtuvo una mejora en la figura de mérito del 25% respecto al modelo anterior y casi el 100% (88%) respecto al modelo de convección natural, llegando a 0.68 l/(Kw-h), con irradiancias máximas de 1,040 watt.
- IV. Los resultados nos indican que el modelo en el que se sustituyó una pared de vidrio por metálica, con una densidad de energía promedio recibida en un día de 6.56 Kw-h/m²; obtuvimos un promedio de 0.925 litros destilados diarios y una figura de mérito de 0.61 l/kw-h.

CAPÍTULO TERCERO

3.1 Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron durante el desarrollo experimental del presente trabajo, concretando y definiendo el prototipo de destilador solar de agua que resultó más eficiente y proporcionando una tabulación obtenida al definir la figura de mérito proporcionando así una herramienta que sirva de soporte para el dimensionamiento de sistemas.

3.2 El prototipo más eficiente de los cuatro desarrollados.

Con las lecturas obtenidas del prototipo original y las tres variantes del mismo, se puede comparar las eficiencias resultantes, y concluir que el tercero, de convección forzada, en el que estamos considerando implementar un ventilador, con lo que estamos agregando un 5% de energía al sistema y un disipador metálico, es el más eficiente; sin embargo, los resultados obtenidos con el cuarto prototipo (pared metálica), son muy similares, tanto, que resulta muy difícil asegurar el hecho de que es más eficiente el tercero que el cuarto.

Cabe recalcar que en los cuatro casos se utilizó la misma área de destilación y se partió del principio de que el destilador debía ser energéticamente autónomo. Se presentan a continuación los resultados obtenidos en la Tabla 3.1, en la que se comparan los cuatro prototipos estudiados, considerando en cada uno la lectura de la insolación recibida en promedio durante los días observados, la cantidad de agua destilada producida en promedio y la eficiencia promedio de cada prototipo; asimismo, se muestra una gráfica comparativa de los cuatro prototipos.

Tabla 3.1 Resumen de resultados globales obtenidos.

| | PROTOTIPO 1 | PROTOTIPO 1-A | PROTOTIPO 1-B | PROTOTIPO 1-C |
|--|-------------|---------------|---------------|---------------|
| DENSIDAD DE ENERGÍA PROMEDIO RECIBIDA DURANTE UN DÍA <i>Kw-h/m²</i> | 7.44 | 7.46 | 6.49 | 6.56 |
| PROMEDIO LITROS DESTILADOS | 0.628 | 0.908 | 0.986 | 0.925 |
| FIGURA DE MÉRITO <i>l/(Kwh)</i> | 0.36 | 0.54 | 0.68 | 0.61 |

Elaboración propia. 2008.

Como puede observarse, el destilador con convección forzada tiene una figura de mérito F aproximadamente 48% mayor que el normal y el que tiene ventilador y disipador, 88% mayor que el normal. En la Figura 3.1 se puede observar una gráfica comparativa de los cuatro prototipos y la desviación estándar de cada día estudiado.

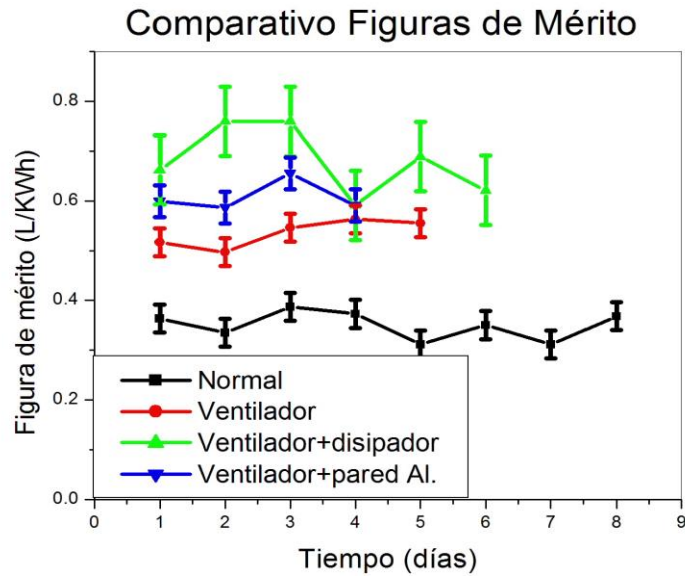


Figura 3.1 Comparativo de la figura de mérito. Elaboración propia, 2008.

En la figura anterior también puede observarse que la dispersión de los datos es considerable. Esto puede deberse a que el rendimiento energético involucra fenómenos no tomados en cuenta como la temperatura ambiente, velocidad del viento, fugas en el sistema, etc.

Se concentran en la Tabla 3.2, los valores que dan origen a la figura de mérito de cada tipo de destilador analizado durante el presente trabajo.

Tabla 3.2 Valores que originan la gráfica comparativa de la figura de mérito de cada modelo analizado.

| DÍAS | PROTOTIPO 1 | PROTOTIPO 1-A | PROTOTIPO 1-B | PROTOTIPO 1-C | UNIDADES |
|------|-------------|---------------|---------------|---------------|----------|
| 1 | 0.36328381 | 0.516807 | 0.662204 | 0.599137 | L/kw-h |
| 2 | 0.33521548 | 0.49705 | 0.75938 | 0.586794 | L/kw-h |
| 3 | 0.38681727 | 0.546225 | 0.758853 | 0.655373 | L/kw-h |
| 4 | 0.37297528 | 0.563296 | 0.591079 | 0.591079 | L/kw-h |
| 5 | 0.31136775 | 0.555146 | 0.688848 | | L/kw-h |
| 6 | 0.35014006 | | 0.621311 | | L/kw-h |
| 7 | 0.31136775 | | | | L/kw-h |
| 8 | 0.36815826 | | | | L/kw-h |

Elaboración propia, 2008.

En la Figura 3.2 se presentan, para su comparación, la irradiancia y las temperaturas del agua, vidrio, aire interior y ambiente, en función del tiempo para un día claro, en este caso. El 8 de marzo del 2008.

En esta figura pueden apreciarse los detalles poco funcionales del destilador tipo caseta, ya que la temperatura del vidrio no es lo suficientemente baja como para que facilite la condensación del vapor de agua del interior del destilador. Este problema se debe principalmente al vidrio, ya que es un buen absorbedor de la radiación infrarroja y un mal conductor de calor. La temperatura del agua es razonablemente buena.

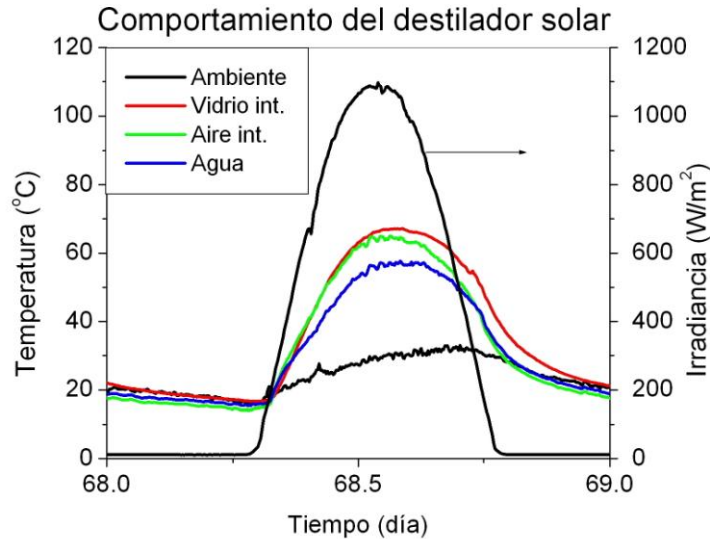


Figura 3.2 Comportamiento del destilador solar. Elaboración propia, 2008.

3.3 La destilación mediante energía solar puede ser económicamente factible en México.

La destilación de agua mediante energía solar es factible económicamente en México, porque el precio de un destilador en relación a su capacidad de producción de agua potable vs la adquisición de agua embotellada (garrafón), puede ser al cabo de un año autofinanciable. Si tomamos como ejemplo los costos derivados del destilador que se usó como modelo, tenemos (ver Tabla 3.3):

Tabla 3.3 Costos de materiales utilizados para la fabricación del destilador solar.

| MATERIALES | PRECIO |
|----------------------------|-----------------|
| VIDRIO | \$200.00 |
| CHAROLAS | \$400.00 |
| VENTILADOR | \$25.00 |
| PARED LATERAL CON REJILLAS | \$200.00 |
| TOTAL | \$825.00 |

Elaboración propia, 2008.

Con estos costos en mente, realicemos el siguiente análisis, en base a los resultados obtenidos en el tercer modelo, que resultó ser el más eficiente:

- a) Destilación diaria obtenida: 0.986 litros.
- b) Costo de agua embotellada (garrafón 19 litros): \$25.00
- c) Basado en el resultado de destilación diaria promedio obtenida, tenemos que en un año se puede destilar: 401.5 litros (365 días x 0.986 l/día).
- d) Estos 401.5 litros equivalen a 21.13 garrafones (401.5/19).
- e) Que a costo de agua embotellada, los 21.13 garrafones, equivalen a \$528.29 anuales.

Cabe mencionar, que para el análisis económico realizado no se consideró la mayor cantidad de agua obtenida en el tercer modelo (1.100 litros), sino el promedio diario de litros obtenidos (0.986 litros).

Se concluye que un destilador pequeño como el utilizado de modelo, resultaría autofinanciable en 1.5 años (825.00/528.29).

Obviamente hay una economía de escala, en la que destiladores de 4 ó 5 veces el área utilizada, resultarían más económicos, de tal forma que la inversión se recupera en menor tiempo. Además aun no se ha hecho un estudio en materiales para economizar sin bajar mucho el rendimiento.

Como se mencionó previamente, existen diversas formas de destilar agua de mar o salobre, en el caso particular de la destilación solar no es comparable con estos métodos, debido a que el área que se utiliza en función del agua destilada recolectada es muy grande; sin embargo, tampoco hay punto de comparación respecto a la inversión que se requiere realizar para su instalación, por ejemplo, una Planta de Ósmosis Inversa. Una Planta de estas características tiene un costo de millones de pesos y sus implicaciones ecológicas, económicas y de capacitación de operación son enormes.

Menciono el caso particular de Plantas de ósmosis inversa, ya que como se describe en el trabajo del M.I. Manuel Fuentes Díaz y Antonio Ramírez González, investigadores del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: "El sistema de ósmosis inversa es la opción más económica para desalar agua salobre y de mar, los costos de inversión de estos procesos para agua de mar van de \$0.32 a \$0.61 USD/m³ para plantas que producen en promedio más de 10,000 m³/d y de \$0.41 a \$0.43 USD/m³ para plantas que producen menos de 5,000 m³/d. Para agua salobre el costo de inversión se reduce de \$0.146 a \$0.30 USD/m³, esto se debe a que los costos de membrana se reducen respecto a las utilizadas para agua de mar." [XVIII].

Resulta importante analizar la Tabla 3.4 en la que se proporciona el costo total de instalación y costo de agua producida por una Planta desaladora. [XIX].

Tabla 3.4 Resumen de costos para las plantas desaladoras

| Caudal l/s | Fuente | Costo inversion (m.n.) | Costo/m ³ (m.n.) |
|---------------|-------------|------------------------------|--------------------------------|
| 200 | Agua de mar | 328,785,000 | 8.51 |
| 400 | Agua de mar | 510,600,000 | 7.70 |
| 800 | Agua de mar | 858,486,500 | 6.90 |

Fuente: "Análisis del costo de tratamiento en tres tipos de fuente para entregar agua potable a las ciudades de Guaymas y Ensenada, México" Antonio Ramírez González, Carolina Santacruz Lara, Sofía Garrido Hoyos, Manuel Fuentes Díaz, César Calderón Mólgora, Leticia Montellano Palacios. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), 2007.

En el caso de la destilación solar como lo mencioné previamente, todos estos costos inherentes a la operación y puesta en marcha de plantas desaladoras, son mínimos, por lo que el método que se propone es de fácil implementación en comunidades aisladas y sin infraestructura hidráulica.

3.4 La destilación solar puede ser técnicamente factible en México.

La destilación solar es factible técnicamente porque:

- I. En su modelo más básico, todos los materiales necesarios para la construcción de un destilador son comerciales y de fácil acceso.
- II. En sus versiones más sofisticadas, existe la tecnología para garantizar que la operación del destilador sea energéticamente autónoma.
- III. Porque la irradiancia que recibe el territorio mexicano, así como el clima que prevalece en la mayoría de las regiones del país, hace propicia la operación y viabilidad de este tipo de instrumentos.

3.5 Obtención de una metodología de correlación.

Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, se ha desarrollado una metodología que correlaciona: la Irradiancia promedio de una zona geográfica, el área ocupada de un destilador solar optimizado (con convección forzada) y la producción en litros de agua destilada.

Con los datos obtenidos se consigue:

- I. Estimar el tamaño de los destiladores a ocupar, en función de la necesidad hídrica y la ubicación geográfica de una comunidad.
- II. El costo de dichos destiladores, la inversión necesaria y el tiempo de retorno de la inversión.

Tomando como base los resultados obtenidos del modelo más eficiente (línea en negritas en la Tabla 3.4), se desarrolló una escala en la que se ilustran diferentes niveles de insolación contra los requerimientos en litros para satisfacer el requerimiento de agua potable de un cierto número de personas.

El resultado obtenido es el área necesaria o requerida en metros cuadrados de un destilador solar. Ver Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Tamaño requerido en un destilador solar con características del tercer modelo analizado en función de la relación de insolación contra volúmenes de agua requerida.

| Insolación Kwh/m ² | Promedio entregado l/día | Área base m ² | Agua requerida 2 l | Agua requerida 5 l | Agua requerida 10 l | Agua requerida 20 l | Agua requerida 50 l |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 6.5 | 0.986 | 0.23 | 0.467 m² | 1.166 m² | 2.333 m² | 4.665 m² | 11.663m² |
| 4 | 0.607 | 0.23 | 0.758 m ² | 1.895 m ² | 3.791 m ² | 7.581 m ² | 18.953 m ² |
| 5 | 0.758 | 0.23 | 0.606 m ² | 1.516 m ² | 3.032 m ² | 6.065 m ² | 15.162 m ² |
| 6 | 0.910 | 0.23 | 0.50 m ² | 1.264 m ² | 2.527 m ² | 5.054 m ² | 12.635 m ² |
| 7 | 1.062 | 0.23 | 0.433 m ² | 1.083 m ² | 2.166 m ² | 4.332 m ² | 10.830 m ² |
| 8 | 1.214 | 0.23 | 0.379 m ² | 0.948 m ² | 1.895 m ² | 3.791 m² | 9.476 m ² |
| 9 | 1.365 | 0.23 | 0.337 m ² | 0.842 m ² | 1.685 m ² | 3.369 m ² | 8.423 m ² |

Elaboración propia. 2008.

Con la finalidad de analizar los resultados obtenidos en la tabla 3.3, consideremos el siguiente ejemplo: Si analizamos el caso de una población rural ó costera que recibe en promedio durante el verano una insolación de 8 kW-h/m²; considerando que una persona requiere un promedio de 5 litros de agua potable diarias para satisfacer sus necesidades de ingesta de agua y tomando como referencia la tabla 3.3, una familia de cuatro integrantes necesitará la instalación de 3.791 m² de destilador tomado como ejemplo.

Cabe señalar que se consideraron 20 litros diarios para una familia en base a que la OMS (Organización Mundial de la Salud) recomienda un mínimo de 20 l/hab/día (dotación de agua diaria para subsistir). Se debe subrayar que se trata sólo de ejemplificar para analizar el comportamiento del dimensionamiento encontrado:

Necesidades Mínimas Básicas de Agua: 20 a 50 l/persona/día.

Distribución de litros que maneja la OPS (Organización Panamericana de la Salud):

| | |
|--------------------------|-----------|
| Saneamiento | 20 |
| Preparación de alimentos | 10 |
| Agua para beber | 5 |
| Higiene | <u>15</u> |
| Total recomendado | 50 |

Resulta importante mencionar que se está considerando que para resolver los problemas de requerimiento de agua, se utilizarán uno ó varios destiladores solares de caseta con la misma área que se maneja en el presente trabajo, interconectados en paralelo, por lo que no aplica para efectos del cálculo de economía de escala.

Ahora bien, basándonos en los resultados obtenidos en la Tabla 3.6, podemos observar que en función de la construcción del destilador solar diseñado, un destilador de mayor área, por ejemplo, 5 m², tendría un costo de \$18,150.00.

Tabla 3.6 Costo de destiladores en función del área requerida.

| ÁREA DESTILADOR → | 0.23 m ² | 0.46 m ² | 0.92 m ² | 1.84 m ² | 2.99 m ² | 3.91 m ² | 5.06 m ² | 10.12 m ² | 15.18 m ² |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| COMPONENTES ↓ | (0.455X51) | (0.5X1) | (0.5X2) | (1X2) | (1X3) | (1X4) | (1X5) | (2X5) | (2X7.5) |
| VIDRIO | \$ 200 | \$ 400 | \$ 800 | \$1,600 | \$ 2,600 | \$ 3,400 | \$ 4,400 | \$,800 | \$13,200 |
| CHARO LAS | \$ 400 | \$ 800 | \$1,600 | \$3,200 | \$ 5,200 | \$ 6,800 | \$ 8,800 | \$17,600 | \$26,400 |
| DISIPADOR | \$ 200 | \$ 400 | \$ 800 | \$1,600 | \$ 2,600 | \$ 3,400 | \$ 4,400 | \$ 8,800 | \$13,200 |
| VENTILADOR | \$ 25 | \$ 50 | \$ 100 | \$ 200 | \$ 325 | \$ 425 | \$ 550 | \$ 1,100 | \$ 1,650 |
| COSTO TOTAL → | \$ 825 | \$1,650 | \$3,300 | \$6,600 | \$10,725 | \$14,025 | \$18,150 | \$36,300 | \$54,450 |

Elaboración propia. 2008

CONCLUSIONES

Los criterios para seleccionar el uso del destilador de caseta para este trabajo son dos; el primero, que técnicamente es el más sencillo de construir y más barato; el segundo, es que fundamentado en bibliografía encontrada, el destilador de caseta con doble caída es hasta un 20% más eficiente que el de caída sencilla [XXIII]. Dado que entre los objetivos primarios de esta Tesis está el desarrollo de un equipo que requiera poca capacitación en su diseño de operación, estos fundamentos justifican la elección.

Después de hacer un análisis de un destilador solar tipo caseta, el cual es el de los más comunes y compararlo con otros del mismo tipo pero con convección forzada y paredes condensadoras, se definió una figura de mérito desde el punto de vista energético y se utilizó esta constante para dimensionar este tipo de sistemas para aplicaciones en pequeños poblados aislados.

Agregando muy poca energía al destilador se obtienen mayores rendimientos. Esta energía se utilizó para mejorar el proceso de convección dentro del destilador y agregando disipadores se mejoró la condensación.

Para evaluar la mejora del rendimiento se definió una figura de mérito, que resultó ser 88% más grande en un sistema con ventilador y disipador que en el tradicional.

En este trabajo, para los sistemas 2,3 y 4, aparte de la energía solar, se introdujo energía eléctrica, que también puede ser de origen solar. Esta energía introducida es la potencia del ventilador, 0.0026 Kw multiplicada por el tiempo, 24 horas. Esta energía representa aproximadamente 3% de la captada por el destilador en un día soleado.

El costo del destilador del presente trabajo es de \$825 pesos. El destilador puede ser completamente solar si se agregan un convertidor cd-cd y 5 celdas solares de medio watt colocadas sobre la pared de condensación, así se generaría energía eléctrica para el ventilador y se conservaría más fresca la pared de condensación, aumentando su rendimiento. Este pequeño sistema fotovoltaico puede funcionar de manera directa sin controlador de carga y sin almacenamiento en baterías.

Suponiendo un costo de \$10 dólares el Watt, se aumentaría en aproximadamente \$300 pesos el costo del destilador, llegando a \$1,025 pesos. Por ejemplo, si se considera una necesidad de 20 litros diarios de agua por habitante, una comunidad costera con una insolación promedio diaria de 7 Hp, necesitaría de alrededor de \$21,525 pesos de destiladores más gastos de instalación y mantenimiento.

La destilación solar en México puede ser técnica y económicamente factible lo cual quedó demostrado con el desarrollo del presente trabajo y cumple con la sustentabilidad requerida para un futuro más amigable con el medio ambiente.

El trabajo de investigación y resultados obtenidos en esta Tesis concuerda con lo enunciado por la ONU como parte de las Metas del Milenio, por lo menos, por las tres siguientes razones:

- 1) Presenta un modelo de destilación de agua autónomo, que opera al 100% con energía solar, es decir, con energía verde, esto garantiza la sustentabilidad del proyecto y hace énfasis en la nula afectación al medio ambiente.
- 2) Es un modelo sencillo de fácil operación, de bajo costo, que puede ser accesible a comunidades aisladas que no cuentan con el servicio de agua potable lo que garantiza la disponibilidad de agua mínima requerida para el uso de agua potable diaria para satisfacer sus necesidades de ingesta de agua, preparación de alimentos y/o limpieza de utensilios de cocina.
- 3) El acceso de las familias a agua limpia garantiza la obtención de otra de las Metas del Milenio al eliminar la posibilidad de deterioro en la salud de las personas por la ingesta de agua que no cumple con los requerimientos mínimos de potabilidad.

Obviamente estas son apenas unas pequeñas aportaciones para un problema global que nos aqueja y nos agobia a todos, el mejorar los niveles de vida de los habitantes del planeta y el encontrar formas sustentables de desarrollar nuestros objetivos individuales, familiares y sociales, sin afectar nuestro entorno, es un reto que sólo podemos lograr empatando nuestros objetivos comunes y rediseñando nuestra relación con el medio ambiente.

Recomendaciones

- 1) Diseñar un plan detallado para la instalación de los destiladores y una capacitación a los usuarios con la finalidad de que puedan ensamblar y operar de manera autónoma los equipos.

Se recomienda para trabajos e investigaciones a futuro:

- 2) Desarrollar un modelo para evaluar teóricamente las variables que integran la figura de mérito con la finalidad de simular en condiciones controladas los diferentes comportamientos y relaciones que existen entre éstas variables.
- 3) Hacer un estudio más exhaustivo de los materiales utilizados, con la intención de buscar alternativas que ayuden a eficientar el destilador propuesto.
- 4) Proponer un modelo de producción a pequeña escala con el cual se puedan optimizar los costos de manufactura del destilador haciendo aún más factible la viabilidad económica.
- 5) El resultado obtenido en este trabajo es que la convección forzada mejora el rendimiento del destilador, por lo que recomendamos el estudio detallado de las características y comportamiento del ventilador, es decir, su tamaño, su velocidad, la intermitencia de trabajo y su ubicación dentro de la geometría del destilador, lo que significa, una optimización energética del mismo.

Un estudio más exhaustivo de la geometría del destilador para eficientar el efecto invernadero y por consecuencia, incrementar la cantidad de agua producto.

Bibliografía

- I. "Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura". Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. 2002. Roma, 2002.
- II. "El agua en México y en el mundo". Instituto Nacional de Ecología. 2002. Alejandro Toledo. Gaceta Ecológica, julio-septiembre, núm. 064. Distrito Federal, México. Pag. 10-11.
- III. "Conservación del agua: única alternativa para el futuro". Fernández A. Enero - marzo, 2001. Tláloc, No. 21, p.2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
- IV. "Agua para el consumo humano". Informe sobre desarrollo humano. 2006. Naciones Unidas.
- V. "El problema del agua". Cumbre de Johannesburgo 2002. Departamento de Información Pública de las Naciones Unidas DPI/2253/Rev.2 - mayo de 2002.
- VI. World Resources 2000-2001, People and Ecosystems: The fraying Web of Life, Instituto de Recursos Mundiales (WRI), Washington DC, 2000.
- VII. "El Agua en México, lo que todas y todos debemos saber", FEA Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. México, D.F./CEMDA Centro Mexicano de Derecho Ambiental, A.C. México, D.F./Presencia Ciudadana Mexicana, A.C. México, D.F./ Primera edición, 2006.
- VIII. "El recurso hídrico en México. Análisis de la situación actual y perspectivas futuras", Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua/The Nippon Foundation/Grupo Editorial Miguel Ángel Porrúa, México.
- IX. "Estadísticas del agua en México 2007", Subdirección General Técnica. Conagua. 2007.
- X. "Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento". Edición 2006. México, 2006. CONAGUA.
- XI. "Introducción a la Desalación". Curso impartido en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, 28 de mayo del 2007 por José Antonio San Juan, Presidente de IDA.
- XII. "Solar Distillation: A Solution for the Pharmaceutical Industry and Vegetal Biotechnology". Alina Roig Rassi. Sergio Corp Linares. Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA). Calle 20 No. 4111, e/ 18A y 47, Miramar, Playa, Ciudad de La Habana , Cuba.

- XIII. "La destilación solar en Cuba". Juan Bermúdez Torres, Investigador Agregado. Ciro Bergues Ricardo, Investigador Auxiliar. Francisco Zenón Cobián, Especialista en Investigaciones. Miembros de CUBASOLAR. Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES).
- XIV. "Energía solar y sus aplicaciones". VIII Congreso Nacional de Ciencias. Exploraciones fuera y dentro del aula 27 y 28 de agosto, 2006 Universidad Earth, Guácimo, Limón, Costa Rica. Ph. Dr. Shyam S. Nandwani.
- XV. "Fundamento de la ciencia e ingeniería de materiales". Ing. William F. Smith. 2da. Edición. 1993. McGraw-Hill.
- XVI. "Fundamentos de transferencia de calor". Jaime Cervantes de Gortari. (1999). UNAM. Fondo de Cultura Económica. México.
- XVII. "Ingeniería termodinámica". William C. Reynolds, Henry C. Perkins. (1980). McGraw-Hill.
- XVIII. "Destilación solar de agua: Destiladores solares con convección natural". XVIII Semana nacional de energía solar. Diciembre de 1994. Hermosillo, Sonora. Pag. 60-64.
- XIX. "Desalación de agua: Una alternativa para resolver la demanda de agua potable en el sur de la República Mexicana". Fuentes Díaz Manuel, Ramírez González Antonio (2003). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- XX. "Análisis del costo de tratamiento en tres tipos de fuente para entregar agua potable a las ciudades de Guaymas y Ensenada, México". Antonio Ramírez González, Carolina Santacruz Lara, Sofía Garrido Hoyos, Manuel Fuentes Díaz, César Calderón Molgora, Leticia Montellano Palacios. (2006). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- XXI. "Experiencias en el uso de destiladores solares en San Luis Potosí y Chihuahua". XXV Semana Nacional de Energía Solar – ANES San Luis Potosí, México; 2001.
- XXII. "Patrones de temperatura en un destilador de laboratorio". España Estrada, Poujol Galván, Fernández Zayas. (1999). XXX Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 271.
- XXIII. "Experiencias finales con un destilador solar indirecto de agua de mar". Fernández Zayas y Chargoy. (1990). XIV Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 162.
- XXIV. "Efectos de borde en la producción de destiladores solares tipo caseta". Eduardo Rubio Cerda, Miguel A. Porta Gándara y José L. Fernández Zayas. (1999). Memorias de la XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 275.

- XXV. "Desarrollo de un sistema automático para estudios de campo de la destilación solar". Rubio Cerda, Porta Gándara y Aldana García. (2001). XXV Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 353
- XXVI. "Análisis de un destilador solar tipo caseta con superficie condensadora aumentada". Solís Correa, Infante Bribiesca, Rodríguez González y Gordon Sánchez. (1997). XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 189
- XXVII. "Análisis experimental de un destilador solar de 2 efectos tipo caseta de una pendiente". Romero Dzib, Hernández Rodríguez y Reyes Coronado. (1997). XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 194.
- XXVIII. "Diseño conceptual de un destilador solar utilizando tubos de calor". Pérez Galindo, Martín Domínguez. (1997). XXI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 200.
- XXIX. "Control electrónico de recarga de salmuera para optimizar la producción y automatizar la operación de un destilador solar somero". Porta, Aldana y Rubio. (1999). XXII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 363.
- XXX. "Influencia de la distancia vidrio-agua en destiladores solares de caseta". Porta, Fernández y Chargoy. (1994). XVIII Reunión Nacional de Energía Solar. Pag. 105.
- XXXI. "Estudio del efecto de la relación (área de condensación/área de evaporación) en destiladores solares estacionarios tipo caseta". Gordon Sánchez, Solís Correa, Ortega Jiménez, Acosta Hernández". (1999). XXIII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 261.
- XXXII. "Modelo matemático de un destilador solar con flujo forzado". Muñoz, Barrera y Vázquez (1992). XVI Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 146.
- XXXIII. "Resultados numéricos contra resultados experimentales usando un destilador solar de triple efecto". Torijano, Vázquez, Torres, Romero-Paredes, Ambríz. (1998). XXII Semana Nacional de Energía Solar. Pag. 178
- XXXIV. "Design parameters, performance testing and analysis of a double-glazed, air-blown solar still with thermal energy recycle". G. Mink, L. Horváth, E. G. Evseev, A. I. Kudish. (1998). Solar Energy, Volume 64, Issues 4-6, Pages 265-277.
- XXXV. "Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems". Sanjay Kumar, G. N. Tiwari. (1996). Solar Energy, Volume 57, Issue Pages 459-464.
- XXXVI. "Analysis of assisted coupled solar stills". G. M. Zaki, Abdulhaiy M. Radhwan, A. O. Balbeid. (1993). Solar Energy, Volume 51, Issue Pages 277-288.
- XXXVII. "Effect of wind on solar distillation". S. H. Soliman. (1972). Solar Energy, Volume 13, Issue Pages 403-415

- XXXVIII. "Effect of inclination of external flat plate reflector of basin type still in winter". Hiroshi Tanaka, Yasuhito Nakatake. (2007). *Solar Energy*, Volume 81, Issue Pages 1035-1040.
- XXXIX. "Multi-stage, indirectly heated solar still". José L. Fernández and Norberto Chargoy. (1990). *Solar Energy*, Volume 44, Issue 4. Pages 215-223.
- XL. "Present status of solar distillation". G. N. Tiwari, H. N. Singh, Rajesh Tripathi. (2003). *Solar Energy*, Volume 75, Pages 367-373.