



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

“Experimentación, simulación y  
análisis del proceso de destilación  
de agua con energía solar”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

F Í S I C O

P R E S E N T A

FERMÍN REYGADAS ROBLES GIL



DIRECTORA DE TESIS: DRA. MARTHA ROSETE AGUILAR

2006



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.

Datos del alumno

Reygadas

Robles Gil

Fermín

01 (612) 122-2376

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Física

Datos del tutor

Dra.

Martha

Rosete

Aguilar

Datos del sinodal 1

Dr.

Augusto

García

Valenzuela

Datos del sinodal 2

Dr.

Daniel

Kammen

Datos del sinodal 3

M. en C.

Ignacio

Campos

Flores

Datos del sinodal 4

M. en C.

Mirna

Villavicencio

Torres

Datos del trabajo escrito

Experimentación, simulación y análisis del proceso de destilación de agua con energía solar

80

2006

Para Mariana, Sandra y Fermín,  
con quienes aprendí a escuchar los ritmos de la vida.

Para Ilse, mi radiante pareja de baile.

Para la UNAM, nuestra maestra de nuevos pasos.

## Agradecimientos

Este trabajo de tesis fue posible gracias al apoyo y asesoría del Dr. Daniel Kamen, la Dra. Martha Rosete Aguilar y el Dr. John Verboncoeur.

Quiero agradecer a las personas que han impactado mi formación académica y personal, en especial al Dr. Darío Moreno Osorio.

También agradezco el apoyo brindado por: Isabel Mercado González, quien ayudo a que se registrara esta pieza y quien trajo a este mundo a mi pareja de baile; el Observatorio Meteorológico de La Paz, B.C.S, en la instalación del destilador solar y la toma continua de datos; el programa de "Movilidad Internacional de Estudiantes" de la UNAM; el Laboratorio de Energía Apropriada y Renovable (RAEL), el grupo de Ingenieros por un Mundo Sustentable (ESW-Berkeley) y el taller mecánico estudiantil del Departamento de Física de la Universidad de California en Berkeley, donde se llevaron acabo la construcción y experimentación de los destiladores solares.

# Contenido

<b>I</b>	<b>Introducción</b>	<b>iv</b>
<b>1</b>	<b>Destilación solar</b>	<b>1</b>
1.1	Relevancia del estudio de destiladores solares . . . . .	1
1.2	Principios básicos del funcionamiento de destiladores solares . . . . .	5
1.3	Modelo sencillo de un destilador solar . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Principios básicos de transferencia de calor y masa</b>	<b>9</b>
2.1	Radiación . . . . .	9
2.1.1	Radiación solar . . . . .	10
2.1.2	Intercambio de energía entre superficies del destilador . . . . .	16
2.2	Conducción . . . . .	23
2.3	Convección . . . . .	24
2.3.1	Externa . . . . .	24
2.3.2	Interna . . . . .	25
2.4	Evaporación y condensación . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Resultados experimentales</b>	<b>32</b>
3.1	Construcción de destiladores . . . . .	32
3.2	Experimentos con la calidad del agua . . . . .	35
3.3	Experimento de la producción de agua de un destilador solar . . . . .	37
3.3.1	Parámetros meteorológicos y sus instrumentos de medición . . . . .	38
3.3.2	Descripción del experimento . . . . .	47
3.3.3	Resultados experimentales . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Simulación del funcionamiento de un destilador solar</b>	<b>58</b>
4.1	Acoplamiento de ecuaciones de transferencia de energía y masa . . . . .	59
4.2	Descripción de la simulación . . . . .	61
4.2.1	Características físicas del destilador solar . . . . .	61
4.2.2	VARIABLES meteorológicas . . . . .	61
4.2.3	Constantes físicas universales . . . . .	62
4.2.4	Ecuaciones de transferencia de calor y masa para el destilador solar . . . . .	62
4.2.5	Ecuación diferencial . . . . .	62

4.2.6	Condiciones para resolver ecuación . . . . .	62
4.2.7	Datos de salida . . . . .	63
4.3	Resultados de la simulación . . . . .	63
4.3.1	Simulación y experimento . . . . .	63
4.3.2	Estimación de producción en distintas regiones geográficas . . . . .	69
4.3.3	Efecto del viento en la destilación . . . . .	72
4.4	Discusión . . . . .	74
<b>A</b>	<b>Código de simulación</b>	<b>76</b>
A.1	Nombre del archivo: "solstill_ode.m" . . . . .	76
A.2	Nombre del archivo: "solstill.m" . . . . .	78
<b>II</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>80</b>

# Introducción

La destilación de agua con energía solar representa una posible solución a la problemática encontrada en varias comunidades del norte del país, así como en otras regiones áridas del globo terrestre, las cuales carecen de una fuente de agua fresca para satisfacer sus necesidades básicas de consumo. Los destiladores pueden llegar a producir entre uno y cuatro litros de agua fresca al día, por cada metro cuadrado de área horizontal, a partir de agua salobre o de mar.

La destilación solar ha sido promovida por múltiples organizaciones durante por lo menos las últimas tres décadas, sin embargo no ha sido implementada a una escala lo suficientemente grande para cubrir las necesidades de un sector creciente de la población que habita en regiones áridas donde el agua con alta salinidad y la radiación solar se presentan en grandes cantidades. Una de las barreras que han impedido la diseminación de esta tecnología ha sido el aspecto social, en especial la falta de una organización o institución que se encargue de diseñar y promover un modelo de destilador solar adecuado a la cultura y recursos locales. Por otro lado, las organizaciones e instituciones que se dedican a implementar proyectos relacionados con la distribución de agua, no han adoptado esta tecnología debido a la falta de herramientas para evaluar su potencial en regiones donde no se han realizado previos experimentos sobre su funcionamiento.

La motivación del trabajo de investigación presentado en esta tesis de licenciatura consiste en entender los procesos que afectan el funcionamiento de los destiladores solares, con la finalidad de poder generar una simulación computacional que sirva como herramienta para evaluar el potencial de esta tecnología en diversas zonas geográficas sujetas a distintos

regímenes climáticos.

La tesis inicia con una descripción de la problemática del agua, la relevancia de los destiladores solares y los principios básicos que rigen el funcionamiento de esta tecnología.

La parte central del trabajo empieza con un análisis de los procesos físicos que afectan el funcionamiento de la destilación solar. En esta sección se describen y derivan detalladamente las ecuaciones de transferencia de calor y masa entre las distintas superficies que conforman un destilador solar.

La siguiente sección de la tesis trata sobre el experimento realizado con un destilador solar instalado en el Observatorio Meteorológico de La Paz, B.C.S., México. Aparte de la descripción del experimento, se lleva a cabo un análisis de los resultados de producción de agua fresca en relación con la radiación solar y la temperatura ambiente.

En la tercer sección del trabajo se presenta el modelo físico que se utiliza en la simulación computacional desarrollada para evaluar el funcionamiento del destilador solar instalado en La Paz. Los resultados de esta simulación se comparan con los resultados obtenidos en el experimento. También se presentan resultados que simulan el funcionamiento del destilador en tres localidades geográficas distintas.

Finalmente se anexa el código de simulación con el objetivo de que el lector interesado pueda expandir este trabajo.

# Capítulo 1

## Destilación solar

### 1.1 Relevancia del estudio de destiladores solares

Según la Organización Mundial de la Salud, una sexta parte de la población mundial no cuenta con acceso a agua potable (WHO 2000). Esto significa que alrededor de mil millones de personas tienen que desplazarse de su vivienda por lo menos 200 metros para encontrar la fuente de agua más cercana o invertir más de 30 minutos diarios en obtener el agua necesaria para satisfacer sus necesidades básicas. Como la definición sobre el acceso a agua potable de la Organización Mundial de la Salud se enfoca en la disponibilidad del recurso hidrológico y no toma en cuenta su calidad, una cantidad aún mayor de la población mundial sufre de problemas a la salud relacionados con el mal estado o carencia de agua para beber.

En regiones geográficas con alta precipitación pluvial, donde el recurso hidrológico es abundante, el problema más grave relacionado al agua es su posible contaminación con organismos patógenos que afectan directamente la salud de los individuos causando infec-

ciones en el aparato digestivo, como parásitos intestinales, amibiasis, salmonela, shigella, leptospirosis y cólera. (Cortés 2001; comunicación personal con Dr. Edgar Ruiz Mercado 30/10/05)

En las zonas áridas o semiáridas, la desertificación producida por la tala de árboles (debido a la expansión de la ganadería, agricultura y silvicultura); el crecimiento poblacional; y las alteraciones en la temperatura y precipitación debido al cambio climático global, ponen cada día mas presión sobre el ya escaso recurso hidrológico. A lo largo de la historia, los derechos de uso del agua se han distribuido de forma desproporcionada, dando prioridad a las actividades industriales y agrícolas. Frecuentemente estas prácticas han llevado a la sobre explotación de los recursos hidrológicos, resultando en una disminución en su cantidad o degradación de su calidad. Cuando el agua es extraída de un río, un lago o el subsuelo, su sobre explotación causa respectivamente que los ríos se sequen en temporadas de escasa lluvia o antes de concluir su caudal, que la superficie de los lagos disminuya o que el nivel del manto freático sea cada vez más profundo. En zonas costeras, la sobre explotación del recurso subterráneo resulta frecuentemente en la intrusión de agua de mar al manto freático, aumentando su salinidad en un proceso prácticamente irreversible. En todos estos casos, las comunidades periurbanas y rurales son las que han sufrido en mayor magnitud los efectos de la sobreexplotación, ya que no cuentan con el capital necesario para expandir la infraestructura de extracción y distribución de agua. Es muy común observar regiones donde la excesiva irrigación de cultivos ha reducido el nivel del manto acuífero de tal forma que los pozos utilizados para extraer agua para fines domésticos se han secado y los habitantes se han visto forzados a obtener agua de fuentes localizadas a gran distancia

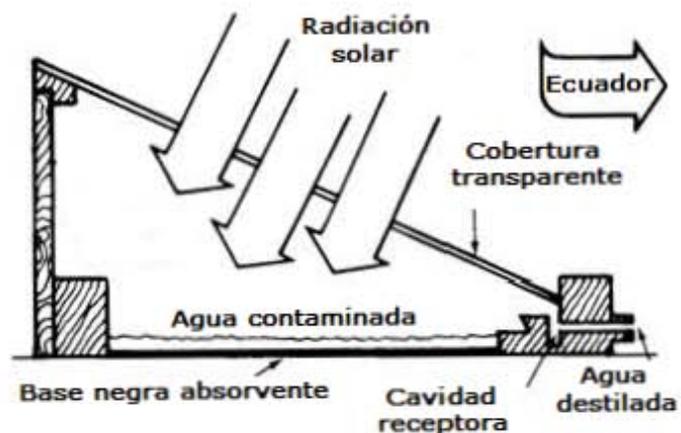
de sus casas, mientras que los conglomerados agrícolas han aumentado la profundidad de sus pozos e instalado bombas de extracción de mayor capacidad. La escasez de agua no solo limita las actividades laborales que los habitantes de estas comunidades pueden llevar a cabo, sino que también se ha encontrado que, debido a que no cuentan con sistemas de distribución de agua formales, las familias de bajos recursos son las que acaban pagando más por unidad de agua consumida, ya sea en gastos de combustible para acarrearla de fuentes lejanas o en el pago a distribuidores informales del líquido vital. Aparte de los costos económicos, las comunidades periurbanas y rurales muestran el mayor índice de enfermedades y padecimientos relacionados con el agua de mala calidad.

Las zonas áridas en el planeta se localizan, principalmente, en unas franjas cercanas a los 30 grados de latitud norte y sur, en la zona subtropical de alta presión donde se juntan las celdas meteorológicas de Hadley y Ferrel. En dichas franjas predomina un movimiento vertical descendente del aire, el cual genera un calentamiento adiabático que dificulta la formación de nubes y precipitación. Los desiertos más importantes son: el Sahara en la región norte de África, extendiéndose hasta la península Arábiga; el de Australia; el del norte y noroeste de México y suroeste de Estados Unidos; el de Thar, en la India y Pakistán; el de Irán; y el de Kalahari, en el sur de África. Además, existen otras zonas áridas que están asociadas a la lejanía del mar y que se encuentran en latitudes más altas como son los desiertos del Turkestán, en el centro de Asia; el Takla Makan y Gobi, en China y Mongolia; y la Patagonia, en Argentina. Algunas corrientes marítimas frías, que se mueven paralelas a las costas continentales, también favorecen o acentúan la formación de los desiertos, como el de Namibia, en el suroeste de África y el de Atacama, en el norte de Chile. La mayor parte

de la población que habita en estos desiertos se ha concentrado en las zonas costeras, ya que estas ofrecen, a través de la pesca y el comercio marítimo, unas de las pocas actividades económicamente productivas que se pueden realizar bajo estas condiciones climáticas de sequía y altas temperaturas. La carencia de agua fresca, en combinación con la cercanía a los inagotables océanos, creó un interés en los habitantes de estas zonas costeras en desalar el agua de mar para producir agua fresca. Los primeros intentos para desalar agua de mar consistieron en exponer una primera sección de un recipiente al fuego directo, hasta que el agua se evaporaba y condensaba en una segunda sección que se mantenía a temperatura ambiente. Debido a la gran cantidad de energía necesaria para evaporar el agua, y por lo tanto la gran cantidad de combustible requerido, el proceso de destilación solo fue utilizado para producir pequeñas cantidades de agua para fines especiales. Para el siglo dieciséis, árabes e italianos ya realizaban experimentos para destilar agua con radiación solar. Sin embargo, no fue hasta el año de 1872 cuando se utilizó la destilación solar para abastecer de manera continua a una comunidad con agua potable. En una comunidad minera en Chile, llamada Las Salinas, se construyó un destilador solar de  $4,500 \text{ m}^2$  que llegaba a producir hasta 22,500 litros de agua al día. El destilador operó satisfactoriamente por más de 40 años, mientras la compañía minera subsidiaba su mantenimiento. A pesar de esta experiencia de éxito, la destilación solar no fue promovida activamente hasta la década de 1960, como parte de los movimientos ambientalista y de tecnologías apropiadas. Durante los últimos treinta años, no solo se han llevado a cabo una serie de instalaciones de destiladores solares en distintos lugares del mundo, sino que también se ha desarrollado una teoría que ahora nos permite entender y modelar su funcionamiento.

## 1.2 Principios básicos del funcionamiento de destiladores solares

El proceso de destilación solar utiliza energía electromagnética proveniente del Sol para calentar el agua y separarla de iones y otros contaminantes de baja volatilidad que se encuentren disueltos en ella. En su manera más simple, un destilador solar consiste en una caja con una cubierta transparente y una base de color negro que contiene un volumen poco profundo de agua. En un día típico, la radiación solar entra a través de la cubierta transparente y es absorbida casi en su totalidad en la base del destilador. El calor disipado en la base es transferido por conducción al delgado volumen de agua, elevando así su temperatura y acelerando el proceso de evaporación. Como la temperatura de la base es mayor que la temperatura de la cubierta transparente, los gases que se encuentran en medio de estas dos superficies entran en un estado dinámico de convección, así el agua recientemente evaporada de la base sube y entra en contacto con la cubierta, donde se condensa y escurre hacia un recipiente de almacenamiento (ver Figura 1)



*Figura 1: Destilador solar*

El desempeño de un destilador solar depende de: 1) el diseño geométrico del destilador, 2) las propiedades físicas de los materiales que lo componen, 3) la calidad de construcción, 4) la disponibilidad de energía solar, y 5) otros parámetros meteorológicos como la temperatura ambiente y la velocidad del viento. El desempeño se mide en términos del agua destilada por área de la base del destilador por día. El desempeño promedio de un buen destilador instalado dentro de los trópicos, varía entre 2 y 4 litros por día por metro cuadrado.

La eficiencia es un parámetro que se utiliza comúnmente para evaluar el desempeño de un destilador solar. La eficiencia, en este contexto, está definida como el cociente de calor utilizado para evaporar cierta cantidad de agua entre la energía disponible en la radiación solar (que incidió sobre la superficie y durante el tiempo que se requirieron para destilar esa cantidad de agua). La eficiencia de destiladores bien diseñados y contruidos varía entre 20% y 30%.

El desempeño y la eficiencia de los destiladores se pueden determinar ya sea realizando experimentos *in situ* o simulaciones por computadora. Los experimento *in situ* tienen la ventaja de que el flujo de agua producida y la radiación solar disponible se pueden medir directamente, llevando así a una mejor caracterización de la unidad destiladora. Sin embargo, realizar experimentos en cada región donde se piense instalar destiladores toma mucho tiempo y es muy costoso. Una buena simulación por computadora no solo puede servir para analizar distintos diseños de destiladores, si no también para evaluar el desempeño de estos en múltiples regiones geográficas.

### 1.3 Modelo sencillo de un destilador solar

Con el objetivo de obtener una estimación cruda del flujo de agua producido por un destilador solar, se puede considerar que este último tiene una eficiencia de 30%. Esta estimación está basada en los resultados de varios experimentos *in situ* (Dunham 1978). Una eficiencia de 30% implica que el 30% de la energía disponible en la radiación solar se utiliza para evaporar agua. Con esta información se puede escribir la siguiente relación:

$$(\text{eficiencia})(\text{radiación solar disponible}) = (\text{calor latente})(\text{masa del agua destilada})$$

sustituyendo el valor del calor latente del agua y un valor típico de radiación solar incidente en la tierra, se obtiene que:

$$(0.3) \left( 7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{d}} \right) = \left( 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) (M)$$

$$(0.3) \left( 25200 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{d}} \right) = \left( 2260 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) (M)$$

$$\Rightarrow M = (0.3) \frac{25200}{2260} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{d}} = 3.34 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{d}}$$

Lo que equivale a la cantidad de agua producida diariamente por un destilador

solar típico.

## Capítulo 2

# Principios básicos de transferencia de calor y masa

Antes de emprender la tarea de simular el desempeño de un destilador solar, es importante revisar los procesos físicos que son responsables de su funcionamiento. Lo mas conveniente en este caso es describir los distintos procesos de forma independiente. Una vez que se tenga una descripción cuantitativa de cada proceso físico, se pueden acoplar entre sí para construir una simulación completa del destilador.

### 2.1 Radiación

Para fines prácticos, los procesos de transferencia de calor por medio de radiación electromagnética pueden ser divididos en dos categorías: la radiación proveniente del Sol y el intercambio de energía electromagnética entre las distintas superficies del destilador y el medio ambiente.

### 2.1.1 Radiación solar

La radiación solar es producto de las reacciones termonucleares que ocurren en el centro del Sol, donde protones se fusionan generando núcleos de helio y produciendo grandes cantidades de energía. La energía liberada es consecuencia de la diferencia de masa entre los cuatro protones reactantes y el resultante núcleo de helio. El proceso de fusión solo ocurre en el núcleo solar, donde la temperatura y presión son suficientemente altas para que los protones libres puedan superar la barrera potencial dada por la interacción nuclear fuerte. Esta asimetría en la producción de energía crea un gradiente de temperatura entre el núcleo, la superficie solar y el espacio interestelar. Este gradiente de temperatura es responsable, a su vez, de la creación de un transporte neto de energía del núcleo, hacia la superficie solar y finalmente hacia el espacio interestelar. En la primera capa, de 0 a 0.6 radios solares, la temperatura es tan alta que los núcleos atómicos se encuentran totalmente ionizados, reduciendo así la opacidad del material y favoreciendo la transferencia de energía a través del mecanismo de radiación. A partir de 0.6 radios solares hasta la superficie, la temperatura disminuye y los electrones se recombinan con los núcleos atómicos, aumentando la opacidad del medio y obstruyendo la transferencia de energía por radiación. En esta zona el mecanismo de convección domina el transporte de energía. En la atmósfera solar, conforme disminuye su densidad, se reduce también la opacidad del medio y el mecanismo de radiación vuelve a predominar la transferencia de energía, esta vez escapando del Sol definitivamente. La zona donde ocurre esta última interacción entre la radiación electromagnética y la materia solar se llama fotosfera y se encuentra a 5,000 K, por esta razón la radiación proveniente del Sol tiene la marca característica de un cuerpo negro a esta

temperatura.

La radiación solar incidente en el exterior de la atmósfera terrestre muestra poca variación temporal tanto en su distribución espectral como en su intensidad, esta última teniendo una magnitud promedio de  $1,353 \text{ W/m}^2$ . La fuente más importante de variación en la intensidad de radiación solar es producida por el cambio en la distancia entre el Sol y la tierra, la cual muestra un cambio de  $\pm 3\%$  en magnitud y puede ser descrita en términos del día del año con la siguiente ecuación (Duffie 1980):

$$I_{ua} = (1,353 \text{ W/m}^2) \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Otra fuente de variación es la periodicidad intrínseca de la energía emitida por el Sol, la cual está relacionada con la actividad de manchas solares y cambia en menos de un 1% en su magnitud.

La radiación que incide en la superficie terrestre muestra dos tipos de variaciones. La más importante está relacionada con el ángulo de incidencia de la radiación solar, el cual varía con los movimientos de rotación y translación terrestres, quedando determinados por la latitud y longitud de la zona geográfica en cuestión. Datos precisos sobre el ángulo de incidencia, y por lo tanto sobre la radiación solar en un punto específico de la superficie terrestre, se pueden consultar en tablas publicadas por centros de investigación (ver bibliografía: NREL) o se pueden obtener elaborando un cálculo con un programa computacional. La segunda variabilidad tiene que ver con las condiciones atmosféricas locales. Los gases, nubes y partículas que componen la atmósfera pueden reflejar, absorber o dispersar la radiación solar, no solamente alterando la intensidad que llega a la superficie de la tierra

si no también cambiando sus características espectrales. Aunque es difícil predecir las condiciones meteorológicas locales, es posible obtener promedios mensuales del número de días nublados, de la presencia de aerosoles, así como de los porcentajes de radiación difusa y directa.

Conociendo las distintas razones por las cuales varia la radiación solar y acoplando las distintas ecuaciones que describen estas variaciones, es posible desarrollar un modelo que nos proporcione una buena aproximación de la magnitud y características de la radiación solar incidente en cualquier punto geográfico a lo largo de todo el ciclo anual.

Con el objetivo de estimar la cantidad de energía disponible para el uso de un destilador solar en una región geográfica específica, es posible obtener valores de radiación solar de la estación meteorológica local o de una base de datos global integrada por mediciones satelitales (ver bibliografía: NASA). Como las variaciones meteorológicas anuales son considerables, es importante utilizar datos que han sido promediados a lo largo de muchos años. El promedio de parámetros meteorológicos a lo largo de 10 años es considerado como un estándar representativo del clima regional.

En teoría, los datos obtenidos a través de estaciones meteorológicas proveen la caracterización más adecuada del clima local, ya que están basados en mediciones *in situ*. Sin embargo, a veces, esta información puede contener huecos temporales en los que no se tomaron datos y puede estar basada en mediciones con instrumentos fuera de calibración. En general la mayor limitante de la información proveniente de estaciones meteorológicas es su reducida cobertura geográfica.

Por otro lado, la información climática derivada de observaciones satelitales es

menos precisa y exacta, debido a que se encuentra en un formato que refleja el promedio de condiciones climáticas de una región geográfica (generalmente de un mosaico de 100 km x 100 km), suavizando las posibles variaciones microclimáticas. Las ventajas de la información climática satelital son su cobertura global y su fácil disponibilidad en una página de internet pública de acceso gratuito.

Para poder realizar una buena simulación computacional de un destilador solar, es necesario utilizar información de radiación solar y temperatura ambiente en un formato semi-continuo. Generalmente es posible obtener datos climatológicos en un formato por hora o día. Cuando se encuentra información por hora es adecuado construir una serie semi-continua llevando acabo una interpolación. Si la radiación solar se obtiene con valores por día, entonces se puede utilizar la siguiente ecuación para convertirla a valores por hora (Duffie 1980):

$$r_t = \frac{360\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{360 \sin \omega_s - 2\pi \omega_s \cos \omega_s} \quad (2.2)$$

donde:

$$r_t = \frac{\text{radiación total por hora}}{\text{radiación total por día}}$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

donde  $\omega$  es el ángulo-hora en grados correspondiente al tiempo en cuestión y donde  $\omega_s$  es el ángulo-hora equivalente a la puesta del Sol del día en turno.

La radiación solar es reportada típicamente como la cantidad de radiación incidente en una superficie horizontal. Como los destiladores solares cuentan con una superficie superior inclinada, puede ser conveniente hacer la conversión de radiación incidente en una superficie horizontal a una superficie inclinada. Para llevar acabo esta conversión podemos descomponer la radiación solar que incide en el destilador en tres componentes: radiación directa, radiación difusa proveniente de la atmósfera y radiación difusa reflejada por la superficie terrestre. La radiación solar directa incidente en una superficie inclinada se puede expresar como  $I_{bT} = I_b R_b$ . Donde  $I_b$  es la fracción de radiación directa de la radiación total y donde  $R_b$  es la proporción de radiación incidente en una superficie inclinada con respecto a una superficie horizontal. Para superficies en el hemisferio norte orientadas hacia el sur (con ángulo azimutal igual a  $0^\circ$ ), como lo suelen estar orientados los destiladores,  $R_b$  se puede calcular de la siguiente forma (Duffie 1980):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta}$$

donde  $\phi$  es la latitud de la posición geográfica del destilador,  $\beta$  es la pendiente de la superficie inclinada y  $\delta$  es la declinación, que puede ser calculada con la siguiente ecuación (Duffie 1980):

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

De manera similar, la radiación difusa incidente en una superficie inclinada se

puede expresar como  $I_{dT} = I_d R_d$ . Donde  $I_d$  es la fracción difusa de la radiación total y  $R_d$  es la proporción de radiación incidente en una superficie inclinada con respecto la radiación incidente en una superficie horizontal. Asumiendo que la radiación difusa es isotrópica, entonces se puede expresar  $R_d$  como el campo de visión de la superficie inclinada hacia la bóveda celeste, teniendo un valor de  $(1 + \cos \beta) / 2$ , y por lo tanto:

$$I_{dT} = I_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

Como el campo de visión de la superficie inclinada hacia la superficie terrestre es de  $(1 - \cos \beta) / 2$  y esta última tiene una reflectancia  $\rho$ , entonces la radiación reflejada incidente en la superficie inclinada del destilador solar es:

$$I_{rT} = \rho (I_b + I_d) \frac{(1 - \cos \beta)}{2}$$

Por lo tanto, la radiación total incidente en la superficie inclinada del destilador solar se puede expresar como:

$$I_T = I_b R_b + I_d \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + \rho (I_b + I_d) \frac{(1 - \cos \beta)}{2} \quad (2.3)$$

Donde  $I_b$  y  $I_d$  se pueden calcular o estimar para distintos escenarios, recordando que  $I = I_b + I_d$  y notando que días brumosos resultarán en una mayor  $I_d$  y días claros en una mayor  $I_b$ . Como referencia, un día claro típico está caracterizado por una  $I_b = 0.75I$  y una  $I_d = 0.25I$ .

En una situación ideal se utilizaría la ecuación 2.3 para determinar la radiación incidente en un destilador solar. A falta de información sobre las condiciones atmosféricas

(en particular, a falta de conocer  $I_b$  y  $I_d$ ), siempre y cuando la inclinación de la cobertura transparente del destilador sea menor a 45 grados, se puede aproximar  $I_T$  como la radiación solar incidente en una superficie horizontal.

### 2.1.2 Intercambio de energía entre superficies del destilador

A través de la ley de Stefan-Boltzman sabemos que la densidad de radiación emitida por un cuerpo esta relacionada con su temperatura de la siguiente forma:

$$q_r'' = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.4)$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman y  $\epsilon$  representa la emisividad del cuerpo.

La emisividad esta definida como el cociente de energía emitida por el cuerpo en cuestión entre la energía emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, esto es

$$\epsilon = \frac{q_r''}{q_{r,cn}''}$$

Para poder describir el funcionamiento de un destilador es necesario tener un modelo de la transferencia de radiación entre una serie de superficies. Por una parte está el transporte interno de radiación, en el cual se deben considerar las cuatro paredes, la base y la cubierta del destilador. También es importante tomar en cuenta el transporte externo de radiación, el cual se encuentra dominado por la interacción entre la cubierta del destilador y la bóveda celeste. Durante el funcionamiento de un destilador, las temperaturas de todas estas superficies cambiarán constantemente y con ello los distintos flujos netos de energía electromagnética entre cada una de ellas. Estos flujos netos de energía, aparte de depender

de la diferencia de temperatura entre las superficies, también quedan determinados por las características geométricas de cada superficie, esto es por su área total y por su orientación respecto al resto de las superficies. En los siguientes párrafos, basándose en el trabajo de Janna (Janna 2000), se derivarán las ecuaciones necesarias para poder determinar los flujos netos entre cada una de las superficies mencionadas.

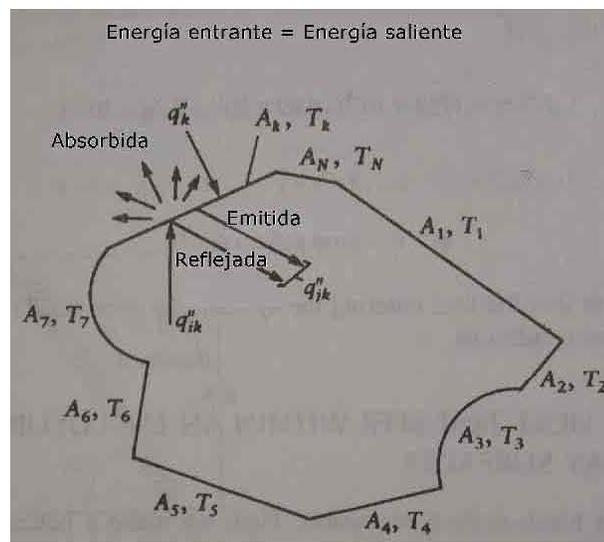


Figura 2: Cavidad con  $N$  superficies difusas grises.

En el cuerpo cerrado de la figura 2, se puede escoger la superficie  $k$  y analizar su transferencia de radiación con todas las  $N$  superficies (las cuales se asume que son isotérmicas). Basándose en la ley de conservación de energía se obtiene que la radiación incidente es igual a la radiosidad (radiación que sale de la superficie):

$$q_k'' + q_{ik}'' = q_{jk}''$$

Multiplicando ambos lados por el área de la superficie  $A_k$ , se obtiene:

$$q_k'' A_k = q_k = (q_{jk}'' - q_{ik}'') A_k \quad (2.5)$$

Utilizando la ley de Stefan-Boltzman, la radiosidad se puede escribir como energía emitida más la reflejada:

$$q_{jk}'' = \epsilon_k \sigma T_k^4 + \rho_k q_{ik}'' \quad (2.6)$$

Donde  $\rho_k$  es la reflectancia de la superficie  $k$ , y su definición es  $\rho_k = 1 - \alpha_k$ . Asumiendo que la superficie es difusa y gris (o sea que la absorptividad y emisividad son independientes del ángulo de visión y de la longitud de onda), entonces  $\alpha_k = \epsilon_k$ , y por lo tanto  $\rho_k = 1 - \epsilon_k$

Substituyendo en la ecuación 2.6, se obtiene que:

$$q_{jk}'' = \epsilon_k \sigma T_k^4 + (1 - \epsilon_k) q_{ik}'' \quad (2.7)$$

Por tratarse de un cuerpo cerrado, la energía incidente en la superficie  $k$  se puede expresar como una serie de términos proporcionales a las radiosidades de cada una de las  $N$  superficies, incluyendo la  $k$ -ésima en caso de que sea cóncava. Las constantes de proporcionalidad son el área de cada superficie y el factor de visión con respecto a la  $k$ -ésima superficie:

$$A_k q_{ik}'' = A_1 F_{1-k} q_{j1}'' + A_2 F_{2-k} q_{j2}'' + \dots + A_N F_{N-k} q_{jN}'' \quad (2.8)$$

Por reciprocidad se tiene que:

$$A_m F_{m-k} = A_k F_{k-m} \quad (2.9)$$

Entonces 2.8 se puede reescribir como:

$$A_k q''_{ik} = A_k F_{k-1} q''_{j1} + A_k F_{k-2} q''_{j2} + \dots + A_k F_{k-N} q''_{jN} \quad (2.10)$$

Cancelando el área  $k$ -ésima en ambos lados de la ecuación y escribiéndola en forma de suma, queda que:

$$q''_{ik} = \sum_{m=1}^N F_{k-m} q''_{jm} \quad (2.11)$$

Despejando  $q''_{ik}$  de 2.7:

$$q''_{ik} = \frac{q''_{jk} - \epsilon_k \sigma T_k^4}{(1 - \epsilon_k)} \quad (2.12)$$

Sustituyendo estos dos últimos resultados en 2.5, se obtienen dos ecuaciones:

$$q_k = A_k \left( q''_{jk} - \sum_{m=1}^N F_{k-m} q''_{jm} \right) \quad (2.13)$$

$$q_k = \left( q''_{jk} - \frac{q''_{jk} - \epsilon_k \sigma T_k^4}{(1 - \epsilon_k)} \right) A_k = \frac{\epsilon_k A_k}{(1 - \epsilon_k)} (\sigma T_k^4 - q''_{jk}) \quad (2.14)$$

Las ecuaciones 2.13 y 2.14 se pueden escribir para las  $N$  superficies de un cuerpo cerrado, obteniendo así  $2N$  ecuaciones simultáneas con  $2N$  incógnitas. La radiosidad,  $q''_{jk}$ , asociada a las superficies es responsable de un número  $N$  de incógnitas, mientras que  $q_k$  y  $T_k$  son responsables de las demás.

Como es de nuestro interés relacionar las temperaturas de las superficies con los flujos netos de energía entre ellas, entonces procederemos despejando  $q''_{jk}$  de 2.14:

$$q''_{jk} = \sigma T_k^4 - q_k \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k A_k} = \sigma T_k^4 - q''_k \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k} \quad (2.15)$$

Sustituyendo  $q''_{jk}$  en 2.13:

$$q_k = A_k \left( \sigma T_k^4 - q''_k \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k} - \sum_{m=1}^N F_{k-m} q''_{jm} \right) \quad (2.16)$$

De la misma forma, pero ahora sustituyendo  $q''_{jm}$  y manteniendo el índice  $m$ :

$$q_k = A_k \left[ \sigma T_k^4 - q''_k \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k} - \sum_{m=1}^N F_{k-m} \left( \sigma T_m^4 - q''_m \frac{(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m} \right) \right] \quad (2.17)$$

Reorganizado los términos se puede llegar a la expresión buscada:

$$q''_k = \sigma T_k^4 - q''_k \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k} - \sum_{m=1}^N F_{k-m} \left( \sigma T_m^4 - q''_m \frac{(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m} \right)$$

$$q''_k \left( 1 + \frac{(1 - \epsilon_k)}{\epsilon_k} \right) = \sigma T_k^4 - \sum_{m=1}^N F_{k-m} \sigma T_m^4 + \sum_{m=1}^N F_{k-m} q''_m \frac{(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m}$$

$$\frac{q_k}{A_k \epsilon_k} - \sum_{m=1}^N F_{k-m} \frac{q_m}{A_m} \frac{(1 - \epsilon_m)}{\epsilon_m} = \sigma T_k^4 - \sum_{m=1}^N F_{k-m} \sigma T_m^4 \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18 representa la transferencia de radiación de la superficie  $k$  con todas las  $N$  superficies de un cuerpo cerrado y como se muestra a continuación resulta muy útil para realizar distintos cálculos de transferencia de radiación en destiladores solares.

Malik y Sodha (Malik 1982, Sodha 1980) han simplificado la simulación de la transferencia de radiación interna de los destiladores eliminando la interacción entre las paredes y asumiendo que la base y la cubierta son dos placas paralelas infinitas. Esta simplificación es válida siempre y cuando el área del destilador sea grande comparado con el tamaño de sus paredes. Con  $N = 2$ , esto significa que  $F_{1-2} = F_{2-1} = 1$  y que  $F_{1-1} = F_{2-2} = 0$ , también  $A_1 = A_2$  y  $q_1 = -q_2$ . Aplicando estas simplificaciones en la ecuación 2.18 se obtiene que:

$$\frac{q_1}{A_1 \epsilon_1} - \frac{q_2}{A_2} \frac{(1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4$$

$$\frac{q_1}{A_1} \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{(1 - \epsilon_2)}{\epsilon_2} \right) = \frac{q_1}{A_1} \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) = \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

$$q_1 = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (2.19)$$

$$q_1'' = \frac{\sigma (T_1^4 - T_2^4)}{\left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (2.20)$$

Si se quiere analizar como las características físicas de las paredes afectan el funcionamiento del destilador, entonces se tiene que considerar la transferencia de calor entre todas las superficies del destilador, incluyendo paredes, base y cubierta. Lo que se puede hacer en este caso para simplificar el cálculo, es suponer que las emisividades de estas superficies son iguales a la unidad, y a partir de la ecuación 2.18, llegar a que:

$$\frac{q_k}{A_k} = q_k'' = \sigma \sum_{m=1}^N F_{k-m} (T_k^4 - T_m^4) \quad (2.21)$$

Esta ecuación es valida solo si las emisividades de las superficies del destilador son cercanas a la unidad. En la siguiente tabla (ver bibliografía: INFRA ) se puede observar que las emisividades de materiales comunes en la construcción de destiladores tienen emisividades cercanas a la unidad.

Material	Longitud de Onda	Emisividad
Agua	5 $\mu\text{m}$	0.98
Vidrio	8 - 14 $\mu\text{m}$	0.92
Acrílico	2 - 6 $\mu\text{m}$	0.94

Otros materiales utilizados en los destiladores, como el concreto, el acero inoxidable y el ladrillo tienen emisividades considerablemente menores. En estos casos la aproximación ya no es valida, a menos de que se encuentren cubiertos con una capa de agua o con pinturas de emisividades altas.

De la ecuación 2.18 también se puede calcular la transferencia de radiación entre la cubierta del destilador y la bóveda celeste. Con  $N = 2$ , y debido a la geometría del problema, se tiene que  $F_{1-2} = 1$  y que  $F_{1-1} = 0$ . Aparte, como el área de la bóveda celeste es mucho mayor que el área de la cubierta del destilador, el segundo término del lado izquierdo de la ecuación 2.18 puede aproximar como cero. Por lo tanto:

$$\frac{q_1}{A_1 \epsilon_1} = \sigma T_1^4 - \sigma T_2^4 \quad (2.22)$$

$$\frac{q_1}{A_1} = q_1'' = \epsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.23)$$

Donde el subíndice  $k = 1$  se refiere a la cubierta del destilador y el subíndice  $m = 2$  a la bóveda celeste.

Las ecuaciones 2.23 y 2.22 serán usadas en el capítulo: Simulación del funcionamiento de un destilador solar.

## 2.2 Conducción

A menos de que se encuentre construido con materiales perfectamente aislantes, todo destilador tendrá pérdidas de calor hacia el medio ambiente a través de sus paredes y base. Estas pérdidas por conducción se pueden calcular fácilmente si se conocen los siguientes parámetros: 1) los coeficientes de transferencia de calor de los materiales de construcción, 2) el área y grosor de las paredes y base del destilador, y 3) los gradientes de temperatura presentes en las paredes y base del destilador.

Hasta este punto se ha construido un modelo del proceso de destilación solar basado en las temperaturas de la base y la cubierta transparente del destilador. Con el objetivo de mantener la simplicidad de este modelo, y considerando que la mayor parte de la energía solar se deposita en la base del destilador, se asumirá que todas las pérdidas de calor por conducción ocurren a través de la base y que no hay pérdidas importantes a través de las paredes del destilador.

El calor perdido hacia el medio ambiente a través de la base del destilador está dado por la siguiente ecuación:

$$q_{con} = h_b (T_b - T_a) \quad (2.24)$$

donde  $T_b$  es la temperatura de la base del destilador,  $T_a$  la temperatura ambiente, y el coeficiente se define como:

$$h_b = \frac{1}{\frac{l}{K} + \frac{1}{h_i}} \quad (2.25)$$

donde  $l$  es el grosor de la base,  $K$  la conductividad térmica del material de construcción usado en la base, y  $h_i$  el coeficiente de transferencia de calor de la base del destilador.

## 2.3 Convección

### 2.3.1 Externa

La cubierta transparente del destilador solar pierde calor hacia el medio ambiente a través de convección libre y forzada. La convección libre domina este proceso a bajas velocidades de viento, pero la convección forzada se vuelve rápidamente el termino dominante conforme la velocidad del viento aumenta.

Realizando experimentos para caracterizar este proceso, varios investigadores han encontrado relaciones empíricas que describen el coeficiente de transferencia de calor de la superficie transparente a la atmósfera en términos de la velocidad del viento. En su trabajo de transferencia de calor de superficies, Watmuff (Watmuff 1977) presenta una relación empírica con un rango de validez amplio y generalizable, describiendo el coeficiente de transferencia de calor de la siguiente forma:

$$h_{viento} = \left(2.8 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) + \left(3 \frac{\text{sW}}{\text{m}}\right) V \quad (2.26)$$

donde  $V$  es la velocidad del viento en metros por segundo.

### 2.3.2 Interna

El proceso de transferencia de calor dentro de un destilador solar está dominado por la convección libre del aire y vapor de agua, que de manera indirecta incluye la transferencia de calor latente entre la base y la cubierta transparente.

Los parámetros que caracterizan la transferencia de calor por convección libre están correlacionados a través de los números de Raleigh ( $Ra$ ), Nusselt ( $Nu$ ), y Prandtl ( $Pr$ ). Estos parámetros adimensionales están definidos de la siguiente forma:

$$Ra = \frac{g\beta' L^3 \Delta T}{\nu \alpha} \quad (2.27)$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.28)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.29)$$

donde:

$g$ = constante gravitacional	$\beta'$ = coeficiente volumétrico de expansión
$\Delta T$ = gradiente de temperatura	$\nu$ = viscosidad cinemática
$h$ = coeficiente de transferencia de calor	$k$ = conductividad térmica
$L$ = separación entre superficies	$\alpha$ = difusividad térmica

En un destilador solar construido con materiales aislantes, la mayor parte de la transferencia de calor ocurre entre la base y la cubierta transparente. Bajo condiciones normales de operación, la base se encuentra a una temperatura mayor que la cubierta

transparente, dando lugar a una convección libre de aire y vapor de agua dentro de un régimen turbulento. Aproximando un destilador solar como un volumen de aire delimitado por dos superficies horizontales, se pueden relacionar los números de Nusslet y Raleigh de la siguiente forma (Malik 1982):

$$Nu = 0.075 (Ra)^{1/3} \quad (2.30)$$

En el caso inusual en el cual la cubierta transparente se encuentre a una temperatura mayor que la base del destilador, entonces el proceso de convección es suprimido y la transferencia de calor interna se limita a procesos de radiación y conducción.

La expresión del gradiente de temperatura, entre la cubierta transparente y la superficie del agua que se encuentra en la base del destilador, tiene que tomar en cuenta las variaciones en la densidad debido a las inhomogeneidades de la concentración de vapor de agua en el aire. Considerando lo anterior, el gradiente de temperatura se debe expresar como (Duffie 1980):

$$\Delta T' = (T_b - T_g) + \left( \frac{p_{wb} - p_{wg}}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - p_{wb}} \right) T_b \quad (2.31)$$

donde  $p_{wb}$  y  $p_{wg}$  son respectivamente las presiones parciales de vapor en la superficie del agua (a temperatura  $T_b$ ) y en la parte inferior de la cubierta transparente (a temperatura  $T_g$ ).

Sustituyendo las definiciones de los números Raleigh y Nusslet en la ecuación 2.30 y despejando el coeficiente de transferencia de calor, se obtiene la siguiente expresión:

$$h = 0.075k \left( \frac{g\beta' \Delta T}{v\alpha} \right)^{1/3} = 0.075k \left( \frac{g\beta'}{v\alpha} \right)^{1/3} \left[ (T_b - T_g) + \left( \frac{p_{wb} - p_{wg}}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - p_{wb}} \right) T_b \right]^{1/3} \quad (2.32)$$

Sustituyendo las constantes por sus valores numéricos se obtiene que:

$$h = 0.884 \left[ (T_b - T_g) + \left( \frac{p_{wb} - p_{wg}}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - p_{wb}} \right) T_b \right]^{1/3} \quad (2.33)$$

Para simplificar esta ecuación se pueden escribir las presiones parciales en términos de la temperatura. Bajo condiciones normales, el gradiente de temperatura del sistema varia dentro de un rango suficientemente reducido que hace posible la aproximación de las presiones parciales con la temperatura a través de una relación lineal (Sodha 1980):

$$p = R_1 T + R_2 \quad (2.34)$$

donde  $R_1 = 293.3 \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$  y  $R_2 = -84026.4 \text{ Pa}$  son constantes calculadas empíricamente y obtenidas en este caso de unas tablas de caracterización de vapor (E. Schmidt 1969).

Combinando las ecuaciones 2.33 y 2.34 se puede obtener una ecuación del coeficiente de transferencia de calor por convección en términos de las temperaturas de las superficies de la cubierta transparente y la base del destilador:

$$h = 0.884 \left[ (T_b - T_g) + \left( \frac{R_1 T_b - R_1 T_g}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - R_1 T_b - R_2} \right) T_b \right]^{1/3} \quad (2.35)$$

$$h = 0.884 (T_b - T_g)^{1/3} \left[ 1 + \left( \frac{R_1 T_b}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - R_1 T_b - R_2} \right) \right]^{1/3} \quad (2.36)$$

$$h_c = 0.884(T_b - T_g)^{1/3} \left( \frac{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - R_2}{2.69 \times 10^5 \text{ Pa} - R_1 T_b - R_2} \right)^{1/3} \quad (2.37)$$

## 2.4 Evaporación y condensación

El flujo neto de masa de aire transferida por convección libre por unidad de área ( $\dot{M}_a$ ) está relacionado con el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) y la capacidad calorífica del gas ( $C_{pa}$ ) en la siguiente forma:

$$\dot{M}_a = \frac{q_{cw}}{C_{pa}(T_b - T_g)} = \frac{h_c}{C_{pa}} \quad (2.38)$$

donde  $q_{cw}$  es el calor transferido por convección,  $T_b$  es la temperatura del agua que está en la base del destilador y  $T_g$  es la temperatura de la cubierta transparente.

Asumiendo que el aire adyacente a la superficie del agua se encuentra saturado y a la misma temperatura que el agua, entonces la humedad específica de la mezcla del gas (o sea la masa de agua por unidad de masa de aire) puede escribirse como:

$$\frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}}{p_T - p_{wb}} \right) \quad (2.39)$$

donde  $M_w$  es el peso molecular del agua,  $M_a$  el peso molecular del aire y  $p_T$  la presión total de la mezcla agua-aire (que se asume como presión al nivel del mar).

Así, el flujo por unidad de área de vapor de agua proveniente de la superficie del agua es:

$$\frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}}{p_T - p_{wb}} \right) \quad (2.40)$$

De manera similar, se encuentra que el flujo por unidad de área de vapor de agua proveniente de la superficie interna de la cubierta transparente es:

$$\frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wg}}{p_T - p_{wg}} \right) \quad (2.41)$$

Por lo tanto, el flujo por unidad de área neto de vapor de agua entre la superficie de agua y la cubierta transparente ( $\dot{m}_e$ ) se obtiene de la diferencia de estas dos últimas ecuaciones y resulta:

$$\dot{m}_e = \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}}{p_T - p_{wb}} - \frac{p_{wg}}{p_T - p_{wg}} \right) \quad (2.42)$$

Introduciendo el término  $\mathcal{L}$  como el calor latente del agua, se puede calcular la cantidad de calor transferida ( $q_e$ ) debido a la transferencia de masa de vapor de agua entre la superficie de agua y la cubierta transparente, de la siguiente forma:

$$q_e = \mathcal{L} \dot{m}_e = \mathcal{L} \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}}{p_T - p_{wb}} - \frac{p_{wg}}{p_T - p_{wg}} \right) \quad (2.43)$$

$$q_e = \mathcal{L} \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}(p_T - p_{wg}) - p_{wg}(p_T - p_{wb})}{(p_T - p_{wb})(p_T - p_{wg})} \right) \quad (2.44)$$

$$q_e = \mathcal{L} \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \left( \frac{p_{wb}p_T - p_{wg}p_T}{(p_T - p_{wb})(p_T - p_{wg})} \right) \quad (2.45)$$

$$q_e = \mathcal{L} \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} p_T \frac{(p_{wb} - p_{wg})}{(p_T - p_{wb})(p_T - p_{wg})} \quad (2.46)$$

Como  $p_T \gg p_{wb}$  y  $p_T \gg p_{wg}$ , entonces  $(p_T - p_{wb})(p_T - p_{wg})$  puede ser aproximado como  $p_T$ . Por lo tanto  $q_e$  queda como:

$$q_e = \mathcal{L} \frac{h_c}{C_{pa}} \frac{M_w}{M_a} \frac{(p_{wb} - p_{wg})}{p_T} \quad (2.47)$$

También se puede escribir  $q_e$  como  $q_e = h_e (p_{wb} - p_{wg})$ , dando lugar a la siguiente importante relación:

$$\frac{h_e}{h_c} = \frac{M_w}{M_a} \frac{\mathcal{L}}{C_{pa} p_T} \quad (2.48)$$

Substituyendo constantes por valores numéricos se obtiene que:

$$\frac{h_e}{h_c} = 0.013 \quad (2.49)$$

Esta relación debería de caracterizar el funcionamiento de los destiladores solares, sin embargo experimentos llevados a cabo por Dunkle (1961) y otros investigadores reportan una razón entre los coeficientes de evaporación y convección de 0.0163. Esta discrepancia es probablemente resultado de las aproximaciones realizadas en la obtención analítica de la ecuación 2.48. Con el propósito de comparar los resultados de este trabajo con los reportados en la literatura, se usará de ahora en adelante el valor obtenido por Dunkle:

$$\frac{h_e}{h_c} = 0.0163 \quad (2.50)$$

Por lo tanto:

$$q_e = 0.0163 (p_{wb} - p_{wg}) h_c \quad (2.51)$$

Así los coeficientes de transferencia de masa y calor por evaporación quedan relacionados de la siguiente forma:

$$\dot{m}_e = \frac{q_e}{\mathcal{L}} = 0.0163 (p_{wb} - p_{wg}) \frac{h_c}{\mathcal{L}} \quad (2.52)$$

Finalmente, usando la aproximación descrita en 2.34, se obtiene respectivamente que:

$$q_e = 0.0163 (T_b - T_g) R_1 h_c \quad (2.53)$$

$$\dot{m}_e = \frac{q_e}{\mathcal{L}} = 0.0163 (T_b - T_g) \frac{R_1 h_c}{\mathcal{L}} \quad (2.54)$$

Como se mencionó con anterioridad, en el caso inusual que la temperatura de la cubierta transparente sea más elevada que la de la base, el proceso de convección es suprimido, así como las transferencias de masa y calor por medio de evaporación.

## Capítulo 3

# Resultados experimentales

### 3.1 Construcción de destiladores

Distintos materiales se han utilizado en la construcción de destiladores solares, cada uno con ciertas ventajas y desventajas.

#### **Estructura del destilador solar:**

Por su facilidad de manejo, costo relativamente bajo y su durabilidad, el cemento resulta ser el material más adecuado para la construcción de destiladores solares en la mayoría de los casos.

La madera barnizada ha sido utilizada por ser económica y fácil de manejar, pero debido a la salinidad del agua y a las altas temperaturas a las que se someten estas unidades, el barniz de la madera acaba degradándose rápidamente, exponiendo la madera a la humedad y creando el peligro de que se descomponga. Por esta razón, las unidades necesitan un continuo mantenimiento que a la larga resulta costoso.

El acero inoxidable presenta una durabilidad inigualable, sin embargo su costo es muy elevado.

La fibra de vidrio es un material muy resistente a las condiciones extremas, así como relativamente barato y fácil de manejar. El problema del uso de fibra de vidrio es que la mayoría de las resinas que se utilizan en conjunto con la fibra contienen materiales tóxicos que pueden degradarse y contaminar el agua. Solo hay un número limitado de resinas que están sintetizadas de manera especial para poderse utilizar en aplicaciones relacionadas con el almacenamiento de agua potable. Aun así, queda la incógnita si al estar expuestas a la radiación solar, estas resinas mantienen sus propiedades inertes o liberan algún tóxico.

#### **Cubierta transparente del destilador solar:**

Para la cubierta transparente, el vidrio ha sido sin duda el material que a probado ser el más adecuado. Su durabilidad en condiciones extremas es inigualable, otra ventaja es que es inerte y por lo tanto no genera ningún tóxico que pueda comprometer la calidad del agua destilada. El único problema del vidrio es que es quebradizo, así que los destiladores se deben instalar en lugares alejados de áreas donde juegan los niños y deben de ser protegidos de fenómenos meteorológicos como tormentas y granizo.

Varios destiladores solares utilizan algún tipo de plástico como cubierta transparente. La ventaja del plástico es que es fácil de transportar y es muy resistente. Sin embargo, solo plásticos especiales pueden soportar la intensa radiación solar sin degradarse. Algunos tipos de plástico, por sus propiedades electrostáticas, no sirven como cubierta ya que el agua no se adhiere ni escurre en ellos y se vuelve a caer en la base del destilador.

A principios del año 2004, construí cinco destiladores solares utilizando fibra de

vidrio en el taller mecánico estudiantil del Departamento de Física de la Universidad de California, Berkeley. El motivo de la construcción de estos destiladores fue comparar las ventajas y desventajas de distintos diseños geométricos, materiales y métodos de construcción. Tres de los destiladores se construyeron con una estructura de cartón cubierta con varias capas de fibra de vidrio y resina (ver Figura 3 y 4). Dos de estos destiladores eran de sección transversal rectangular y tenían una cubierta de vidrio. El tercero tenía una sección transversal circular y una cubierta de plástico flexible hundida en forma de "V" hacia al centro del destilador. Los otros dos destiladores fueron construidos con paredes y base de acrílico.



*Figura 3: Estructura de cartón.*



*Fig 4: Cubierta fibra de vidrio.*



*Figura 5: Destiladores solares de fibra de vidrio.*

### **3.2 Experimentos con la calidad del agua**

Aparte de remover las sales del agua, los destiladores solares han probado ser muy eficaces en remover otros contaminantes no-volátiles. Un trabajo de investigación realizado por Hanson, reporta resultados en los que la concentración de salinidad, durezas totales, nitratos y flúor se reducen en más de 99% con el uso de un destilador (Hanson 2004). Basado en estos resultados, Hanson asume que los destiladores solares también tienen la capacidad de remover metales pesados como el arsénico, molibdeno y selenio. Este mismo estudio

reporta que los destiladores pueden remover el 99.9% de bacterias suspendidas en el agua. Experimentos realizados por Hanson muestran que la capacidad para remover compuestos-orgánicos-volátiles, tales como pesticidas, varía con la volatilidad del compuesto. Para pesticidas con alta volatilidad, se encontró una concentración elevada de estos contaminantes en el agua destilada.

En el verano del 2004, realicé junto con otros estudiantes de la Universidad de California en Berkeley, una serie de experimentos para medir la capacidad de los destiladores para remover sodio del agua. Los experimentos se llevaron a cabo con un destilador de fibra de vidrio instalado en el Observatorio Meteorológico de La Paz, Baja California Sur, y consistieron en tomar muestras del agua antes y después de haber sido destilada. El agua con sodio provino de un pozo de agua salobre. Una vez tomadas las muestras, las analizamos en el Laboratorio de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua, utilizando un fotómetro de flama Corning<sup>TM</sup>-412. Con el fotómetro se pueden obtener mediciones relativas de la intensidad de una línea espectral producida en una flama debido a la oxidación del sodio disuelto en el agua. Llevando a cabo mediciones de soluciones estándares a 10, 20, 30, 50, y 100 ppm de sodio se puede generar una curva de calibración, con la cual se pueden interpolar y extrapolar las mediciones del fotómetro para encontrar sus valores equivalentes de concentración de sodio. Los resultados de nuestro experimento mostraron una reducción de sodio de  $(800 \pm 10)$  ppm antes de ser destilada a  $(20 \pm 10)$  ppm después de ser destilada. Esto es equivalente a una reducción de entre 96.2% y 98.8%.

En diciembre de 2004, realicé un experimento para medir la capacidad de remover arsénico de los destiladores solares. En esta ocasión, utilicé uno de los destiladores de fibra

de vidrio que construí en el Departamento de Física y lo instalé en el techo de uno de los edificios de la Universidad de California. Se mezcló agua con una solución de arsénico y se tomo una muestra antes de ser introducida al destilador. Después de un ciclo de 24 horas, se tomo una muestra del agua destilada. Ambas muestras fueron analizadas para medir su concentración de arsénico con un kit llamado Arsenic Quick de la compañía Industrial Test Systems. Los resultados mostraron una reducción de la concentración de arsénico de  $(0.5 \pm 0.01)$  ppm a  $(0 \pm 0.01)$  ppm, o sea de más de 98%.

Estos resultados son importantes ya que no existen experimentos similares reportados en la literatura. El potencial de los destiladores solares podría verse expandido a no solo remover sales, si no también arsénico en lugares como Bangladesh donde es un problema muy grave.

### **3.3 Experimento de la producción de agua de un destilador solar**

En agosto de 2005, inicié un experimento con un destilador solar instalado en el Observatorio Meteorológico de la ciudad de La Paz, Baja California Sur, con el objetivo de generar datos de la producción de agua destilada a lo largo de las distintas estaciones del año y poder relacionar estos resultados con datos meteorológicos que afectan el funcionamiento del destilador. Se escogió la ciudad de La Paz por su localización geográfica y condiciones climáticas, las cuales son representativas de las zonas donde existen mayores problemas de carencia de agua dulce y donde los destiladores solares presentan su mayor potencial de producción de agua. La instalación del destilador en el Observatorio Meteorológico hace

posible que se mida la cantidad de agua destilada cada hora del día durante todos los días del año, como parte de la rutina de la institución, y que estos datos se comparen con valores de radiación solar y temperatura ambiente medidos en el mismo sitio.

La recolección de datos de agua destilada a lo largo del año genera valiosa información del potencial que ofrecen los destiladores solares para resolver algunos de los problemas del agua en la región. Pero aun más importante, la colaboración con el Observatorio Meteorológico, genera la oportunidad de comparar los datos de agua destilada con los parámetros meteorológicos, con el fin de validar la simulación computacional del proceso de destilación solar. Dicha simulación puede ser útil para desarrollar un mejor entendimiento del proceso de destilación y para estimar el potencial que ofrecen los destiladores en otras regiones geográficas con otras condiciones climáticas.

### **3.3.1 Parámetros meteorológicos y sus instrumentos de medición**

#### **Balance energético y su efecto en el clima**

La radiación electromagnética emitida por el Sol abarca un rango muy amplio de longitudes de onda que van de los  $10^{-4}$  micrómetros a los  $10^4$  metros. Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, todos los componentes de esta última contribuyen, en mayor o en menor medida, en la atenuación de la radiación hasta que ésta llega a la superficie terrestre. Esta atenuación es resultado de los mecanismos de absorción y dispersión de distintos componentes atmosféricos (ver bibliografía: OMM).

Los gases son absorbentes selectivos, es decir absorben solamente ciertas longitudes de onda dejando pasar otras. En las capas altas de la atmósfera, los procesos principales

son la absorción de los rayos X y ultravioleta por el oxígeno, el ozono y el óxido nitroso; y la dispersión de los rayos violeta y azul del espectro visible. Solamente las longitudes de onda más largas, como los rayos visibles, infrarrojos y de radio, alcanzan a llegar a las capas más bajas de la estratósfera y a la tropósfera, donde la atenuación es causada por la absorción del vapor de agua, el bióxido de carbono, los aerosoles y otros compuestos en menor porcentaje. El nitrógeno y el oxígeno, que son los componentes principales de la atmósfera, atenúan la radiación solar a través de la dispersión de las moléculas (dispersión de Rayleigh), sobre todo, en las regiones ultravioleta y visible del espectro. La radiación solar no es solamente dispersada por las moléculas de los gases y el vapor de agua, si no también por los aerosoles y las gotas de agua y cristales de hielo que forman las nubes.

La superficie terrestre, por otro lado, absorbe una gran parte de la energía emitida por el Sol y, a su vez, emite una radiación de onda larga que es en gran parte absorbida por la atmósfera, elevando su temperatura. Otra porción de la radiación es reflejada al espacio (albedo), misma que no participa en el calentamiento de la atmósfera ni en el de la superficie terrestre.

La energía calorífica se transfiere en la atmósfera principalmente a través de la radiación y la convección. Esta última forma de transferencia de calor se lleva a cabo de dos maneras: una, a través de la elevación y el mezclado del aire calentado, o sea el calor sensible; y la otra, a través del calor latente que es almacenado en el vapor de agua y transportado por el aire, hasta que es liberado por la condensación. En la atmósfera, también se lleva a cabo la transferencia de calor por medio de la advección, o sea, a través del movimiento horizontal del aire.

Existe un equilibrio entre la radiación procedente del Sol y la emitida por la Tierra y la atmósfera. Las zonas en donde hay un superávit o un déficit constantes, se mantienen en equilibrio por el transporte de energía calorífica hacia los polos. Sin embargo, el balance energético varía de un lugar a otro dependiendo de la cantidad de absorción y de reflexión de la radiación, así como también, de la influencia de las masas de aire que transportan aire más frío o más cálido.

El albedo depende, entre otros factores, del tipo de superficie a la cual llega la radiación: suelo o rocas, cubierta vegetal, agua, nubes, nieve o hielo; y varía según el color, la estructura y la humedad de la superficie, o la transparencia del agua. De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM), los valores más altos de albedo son para las superficies cubiertas por nieve fresca (70 a 90%); para los suelos, los valores más altos corresponden a los de color claro y que están secos y comprimidos (35 a 45%), en general, como los suelos de las zonas áridas. El albedo de los cuerpos de agua, varía según su transparencia y las condiciones de iluminación. Cuando el Sol está alto sobre el horizonte, el albedo de la superficie del agua es bajo (3 a 5%) y conforme disminuye el ángulo de inclinación, el albedo aumenta, hasta encontrar su valor más alto cerca del horizonte (15 a 65%); asimismo, las olas en la superficie del mar reducen el albedo. El albedo de las nubes, también varía considerablemente, se incrementa según aumenta la cantidad y espesor de las nubes; de ahí que el albedo más alto sea para los cúmulos y nimboestratos (85%) y el más bajo para los cirros (36%).

La inclinación de los rayos del Sol con respecto a la superficie está determinada por la latitud, la hora del día y la estación del año, mismos que influyen en la intensidad y

la duración potencial diaria de la insolación en una localidad.

En los grandes desiertos del mundo, que se encuentran en una zona subtropical, la máxima altura del Sol se presenta en el solsticio de verano cuando también se tiene la máxima duración potencial de insolación. Durante los equinoccios de otoño y primavera, el Sol tiene una altura menor y los días y noches duran 12 horas, respectivamente; y en el solsticio de invierno se presenta la más baja altura del Sol con respecto al horizonte y la más corta duración del día. Estas diferencias de altura del Sol y duración del día entre el verano y el invierno traen como consecuencia una significativa reducción en la intensidad de la energía solar recibida que, a su vez, se refleja en las variaciones de temperatura entre una estación del año y otra.

### **Radiación solar y el piranógrafo bimetalico de Robitzsch**

Además de los aspectos astronómicos, existen otros factores que influyen en mayor o menor medida en la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre, como son la nubosidad, la turbiedad del aire y las condiciones meteorológicas en general.

En el cinturón subtropical de alta presión, localizado una latitud aproximada de  $30^\circ$ , se encuentran los grandes desiertos del mundo. En estos anticiclones o sistemas de alta presión se presenta una subsidencia o descenso del aire que provoca un calentamiento adiabático, mismo que genera un ambiente seco en el cual no se forman nubes. Es en estas latitudes donde se presentan las máximas incidencias de radiación solar en la Tierra.

El piranógrafo bimetalico de Robitzsch está diseñado para proporcionar un registro continuo, mediante un sistema de relojería que puede ser usado de manera diaria o semanal,

de la radiación total que incide sobre una superficie horizontal.

El detector del instrumento consta de dos pares de bandas bimetálicas, un par pintado de negro y el otro de blanco, unidos por un extremo a una placa metálica. Las placas blancas están sujetas al armazón del instrumento por uno de sus extremos, mientras que las negras están unidas al mecanismo registrador. De esta manera, se obtiene por el efecto de la temperatura ambiente, un dispositivo compensador de la temperatura. La desviación del extremo libre de las bandas negras es transmitida mediante un sistema amplificador de palancas a la plumilla registradora. Las bandas negras y blancas se flexionan en direcciones opuestas por un cambio en la temperatura del aire entre ellas y reaccionan solo a una diferencia de temperatura resultante de la radiación solar.

El domo de cristal está herméticamente sellado, es transparente a las longitudes de onda de 0.36 a 2.5  $\mu\text{m}$ .

Un estuche hermético al aire y a la humedad, pintado de blanco para reducir la absorción de calor, cubre los detectores y el mecanismo de registro. Una pequeña ventana en el frente permite observar la lectura de la banda sin abrir el instrumento.

El piranógrafo de Robitzsch es un instrumento robusto que necesita poco mantenimiento.

### **Temperatura y el termómetro de ambiente**

La latitud es uno de los principales factores que influyen en la temperatura y, por lo tanto, en el clima de un lugar ya que determina procesos como la insolación y la incidencia de la radiación solar. Por esta razón, la temperatura disminuye conforme aumenta la

latitud. Sin embargo, existen otros factores que actúan, en mayor o en menor medida, en la temperatura de un sitio, como son: la cercanía o lejanía al mar (continentalidad), la altitud, el tipo de corrientes marítimas que bañan las costas, la orografía, la posición geográfica con respecto a los vientos dominantes, la vegetación del lugar, la nubosidad y la cantidad de humedad que hay en el ambiente, el tipo de suelo del mismo y la influencia de los diferentes tipos de masas de aire.

Las variaciones diurnas y anuales de la temperatura están directamente relacionadas con el balance de la radiación local. La franja de los grandes desiertos del mundo presenta altas temperaturas medias anuales que, por encontrarse fuera de los trópicos, presentan un máximo en los meses de verano y un mínimo en los de invierno.

La oscilación de la temperatura se ve determinada, entre otros factores, por la cantidad de vapor de agua presente en el aire y por la cercanía al mar, a través de su efecto moderador de la temperatura. Debido a la escasa humedad del aire en las zonas desérticas, la oscilación térmica diaria es alta. Durante el día, la escasa nubosidad permite que la radiación solar sea muy intensa y la temperatura muy alta, en cambio durante la noche, el escaso vapor de agua es insuficiente para absorber el calor generado durante el día por lo que la temperatura puede llegar a disminuir considerablemente.

De la misma manera que existe un desfase entre la hora de mayor incidencia de radiación solar y la hora en que se registra la temperatura máxima en un día; también se presenta un desfase a lo largo del año entre el mes de mayor incidencia de radiación solar y el mes más cálido. Este retraso es, aún, mayor cerca del mar.

El termómetro de ambiente usado en los Observatorios Meteorológicos del Servicio

Meteorológico Nacional es de tipo líquido. Está formado por un depósito de vidrio esférico que se prolonga por un tubo capilar de vidrio cerrado en un extremo y el líquido usado es el mercurio. Este termómetro se coloca en forma vertical en la caseta o abrigo meteorológico a 1.5 m de altura sobre el suelo.

### **Viento y el anemómetro**

El movimiento horizontal del aire es causado por las variaciones de presión que son resultado del calentamiento diferencial de la superficie terrestre o bien, por factores dinámicos en la atmósfera misma. Este movimiento es de gran importancia en el balance energético e hidrológico porque puede provocar el transporte de aire cálido o frío, húmedo o seco de una región a otra.

La dirección y la velocidad del viento, están determinadas principalmente por el gradiente de presión y la desviación de Coriolis. Pero dentro de la capa límite, aproximadamente hasta los 1,000 metros de altitud, el movimiento del aire también está modificado por la rugosidad del suelo, la naturaleza de la superficie y las fuentes de calor. El efecto de rozamiento es mayor cerca del suelo, donde el viento sopla sobre una superficie rugosa y puede producir turbulencia. Este efecto se reduce rápidamente con la altura hasta que desaparece al final de esta capa límite.

Los instrumentos de medición del viento en los Observatorios Meteorológicos deben estar ubicados a diez metros por encima de un terreno abierto a una zona en donde la distancia entre el aparato y cualquier obstáculo sea al menos diez veces la altura del obstáculo.

Los anemómetros miden la dirección y la intensidad del viento. La dirección es

medida mediante una lámina metálica de forma rectangular fija en una varilla metálica que pivotea y gira alrededor de un eje vertical. El peso de la lámina es equilibrado por un contrapeso en el otro extremo de la varilla. Como la presión del viento es aplicada a la lámina metálica del lado de barlovento del eje que pivotea, la veleta tiende a orientarse de manera tal que apunta por sí sola hacia la dirección de la cual proviene el viento.

La intensidad del viento puede ser medida por los anemómetros de cazoleta o de hélice. Los más comunes son los de cazoleta que están basados en el uso de un molinete con tres o cuatro cazoletas de plástico o aluminio montadas simétricamente alrededor de un eje vertical en los extremos. Debido a que la fuerza del viento es mayor sobre el lado cóncavo de la cazoleta en comparación que el lado convexo, la corriente de aire hace girar el molinete.

Por lo general, el indicador de la intensidad del viento es un contador digital de tipo mecánico accionado por un engranaje de conversión apropiado entre el eje del detector y el árbol del contador.

### **Precipitación y pluviómetro**

La precipitación es el agua en estado líquido o sólido que cae desde las nubes hasta la superficie terrestre. Esta se puede presentar en forma de lluvia, nieve o granizo según el tipo de nube y la temperatura que haya en el ambiente. Además, según su origen, existen diferentes tipos de precipitación como: convectiva, ciclónica, orográfica, frontal y monzónica.

En términos generales, existen grandes centros de baja y alta presión que influyen

en la presencia o ausencia de nubosidad y precipitación en la atmósfera. Dentro de las zonas de mayor precipitación se encuentran las regiones ecuatoriales y las latitudes medias que están asociadas a los sistemas de baja presión de la zona intertropical de convergencia y el frente polar, respectivamente.

En cambio, las zonas más secas del mundo están asociadas a los sistemas de alta presión del cinturón subtropical ubicado cerca de una latitud de  $30^\circ$  y de las calmas polares.

Otros sistemas meteorológicos regionales o locales como los ciclones tropicales, los frentes y los monzones, o bien las barreras orográficas también pueden originar fuertes precipitaciones.

La precipitación se mide mediante la captación de agua en un determinado tipo de recipiente. El pluviómetro más común consiste en un cilindro metálico de abertura horizontal, circular y de diámetro conocido, en donde se colecta y mide, a intervalos regulares la cantidad que cae por unidad de área de la abertura del medidor y que es igual a la cantidad de precipitación por unidad de área que cae en los alrededores.

El pluviómetro tiene un embudo de tapa y en su interior hay un recipiente en donde se acumula el agua. La lectura de la altura del agua se realiza con una regla o con una probeta graduada. Las unidades de precipitación son medidas lineales (milímetro o pulgadas) y la precisión con que debe leerse es de 0.1 mm.

Los aparatos que sirven para medir la precipitación se colocan a una altura que varía entre 45 a 100 cm de la superficie del suelo, y el recipiente debe estar alejado de árboles y construcciones que puedan impedir la caída libre de la precipitación. (ver bibliografía: SMN, Ayllón 1996)

### 3.3.2 Descripción del experimento

A finales de agosto de 2005, se instaló un destilador solar de fibra de vidrio en el Observatorio Meteorológico de La Paz, B.C.S. El destilador tiene una base cuadrada con una área de  $1 \text{ m}^2$ , cubierta por un vidrio inclinado que se encuentra sellado con silicón a las paredes del destilador. La inclinación del vidrio esta dada por la diferencia de altura de las paredes del destilador, de un lado es 30 cm y del otro 10 cm. Del lado más bajo, hacia donde escurre el agua una vez que está en funcionamiento, se encuentra un canal conectado a una manguera delgada que conduce al agua destilada a un jarrón graduado cada 100 ml (ver Figura 6). Cerca de una de las esquinas de la base, el destilador tiene una manguera que sirve para introducir y drenar el agua salobre. El vidrio inclinado del destilador está apuntando hacia el sur. El destilador se encuentra elevado 20 cm sobre el suelo.



*Figura 6: Destilador solar instalado en el Observatorio*

*Meteorológico de La Paz, B.C.S.*



*Figura 7: Jarrón.*



*Figura 8: Llenando destilador.*

Durante los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2005, los trabajadores del Observatorio Meteorológico tomaron mediciones cada hora del día de la producción del agua del destilador solar, anotando la cantidad de agua acumulada en el jarrón graduado.

### **3.3.3 Resultados experimentales**

Basado en los datos obtenidos para los meses septiembre, octubre y noviembre de 2005, hice una serie de gráficas en las que se compara la destilación de agua con la temperatura ambiente y la radiación solar. Cada una de estas gráficas está generada con el promedio de datos obtenido a lo largo de un periodo de diez días consecutivos, o sea de una decena. Se tuvo que realizar este promedio por que los datos de producción de agua destilada tienen un ruido aleatorio que no favorece su comparación con otros parámetros meteorológicos. Se escogió hacer el promedio cada diez días, ya que es un formato utilizado comúnmente para reportar datos en estaciones meteorológicas.

### Temperatura ambiente y destilación

De la figura 9 a la 16, se puede observar como la producción de agua destilada sigue una trayectoria sincronizada a la trayectoria de la temperatura ambiente, comenzando el asenso y descenso a la misma hora del día. También se puede observar como la producción máxima de agua destilada cambia drásticamente, al igual que la temperatura máxima, de la segunda decena de septiembre (ver Figura 9) a la tercer decena de noviembre (ver Figura 16). El cambio de temperatura máxima entre estas dos decenas fue de  $37.5^{\circ}\text{C}$  a  $28^{\circ}\text{C}$  y el cambio en la producción máxima de agua destilada fue de 470 ml a 250 ml.

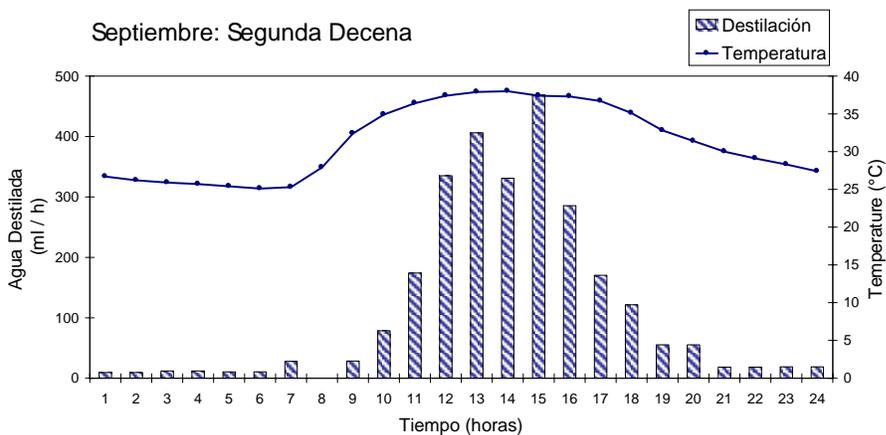


Figura 9

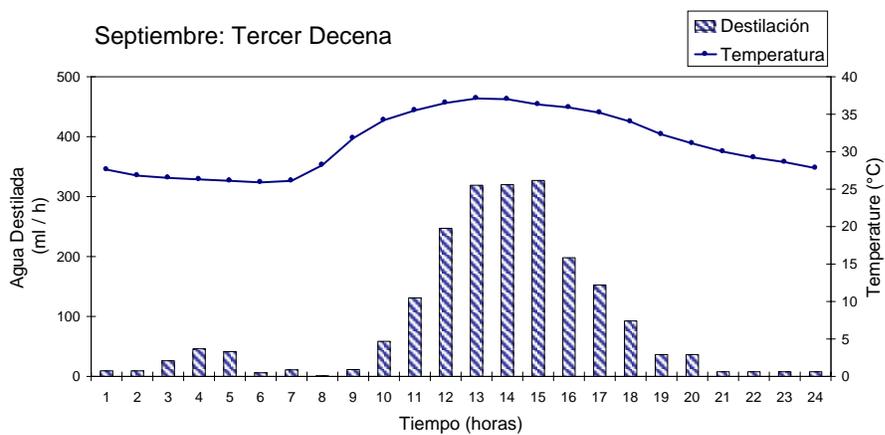


Figura 10

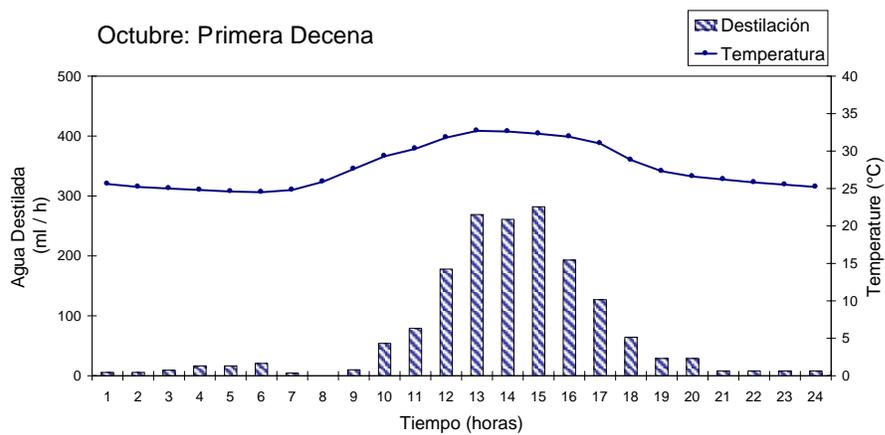


Figura 11

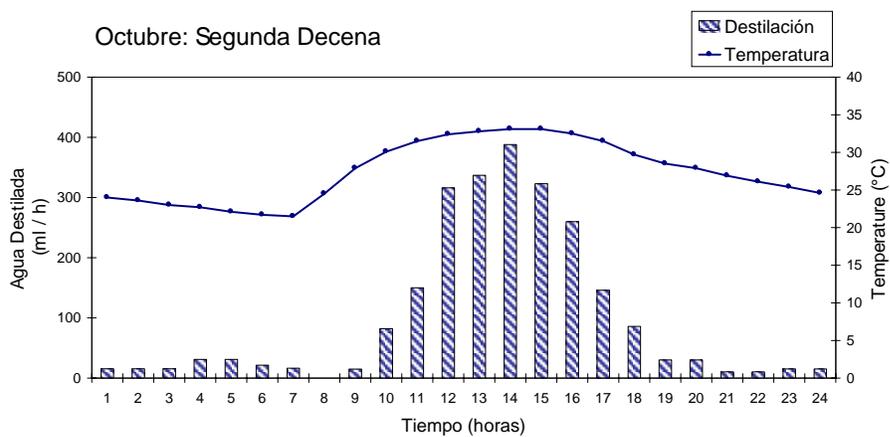


Figura 12

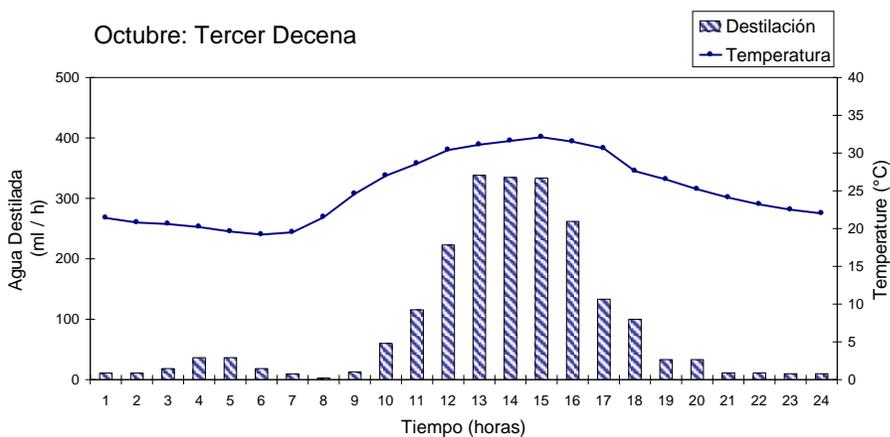


Figura 13

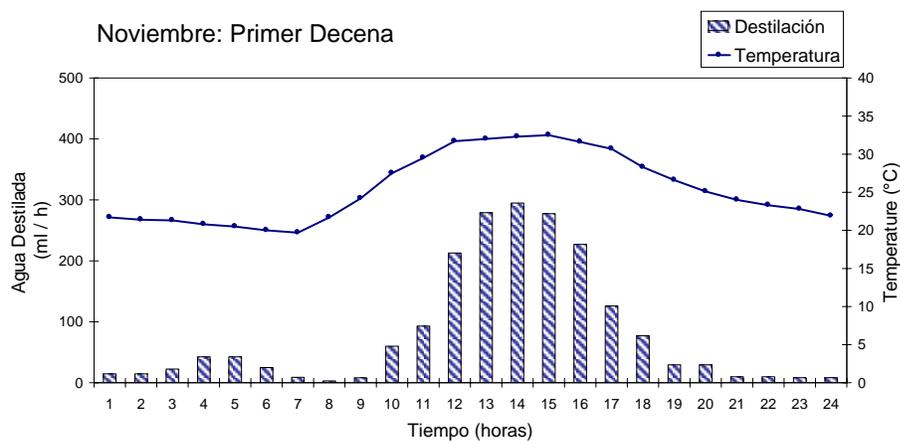


Figura 14

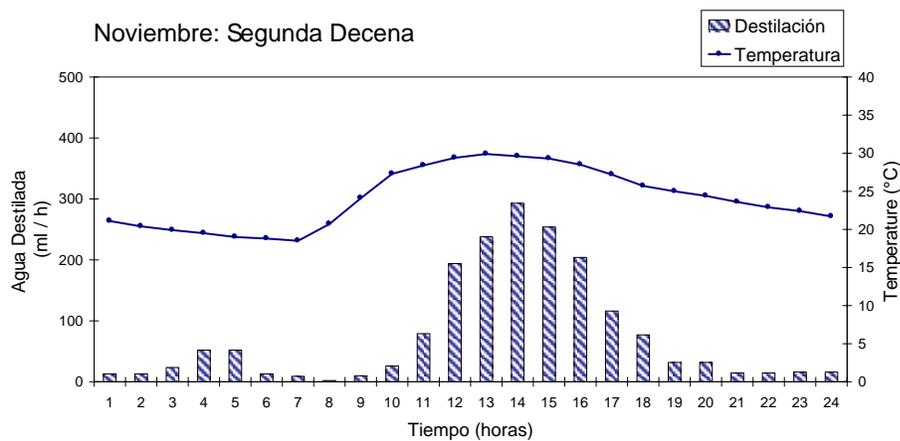
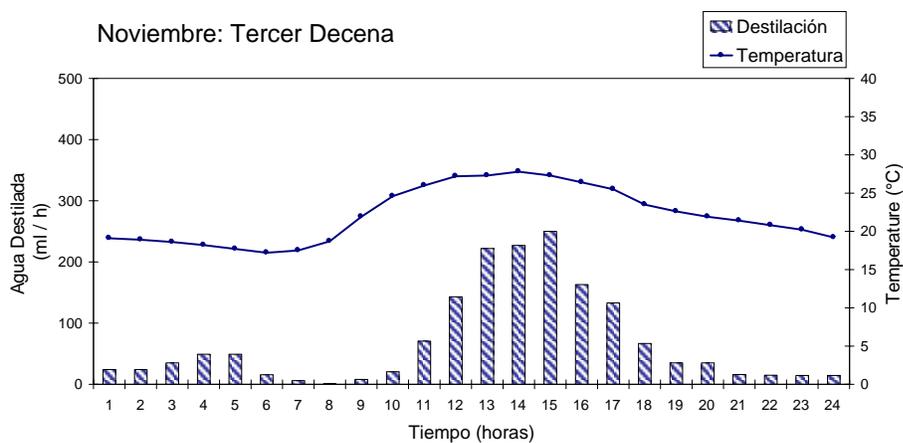


Figura 15



*Figura 16*

### Radiación y destilación

En las figuras 17 a 24 se puede observar la producción de agua destilada en comparación con la radiación solar. Las características más importantes de estas gráficas son el retraso en la producción de agua con respecto a la radiación solar, y la forma en la que disminuye la producción de agua de manera inmediata una vez que empieza a bajar la radiación solar. Claramente el retraso de la producción del agua con respecto a la radiación solar, se debe a la gran cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del agua y evaporarla.

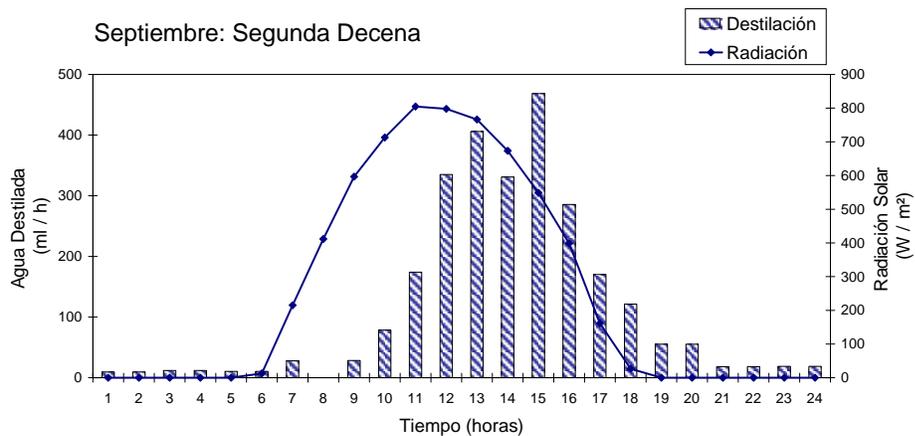


Figura 17

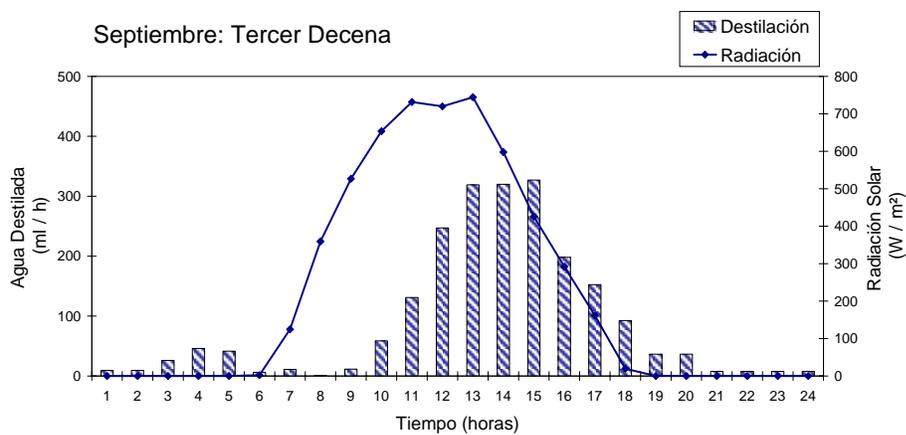


Figura 18

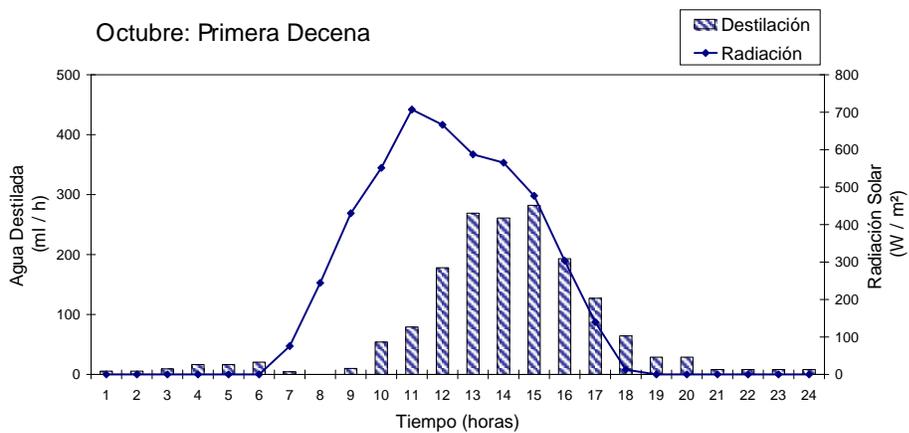


Figura 19

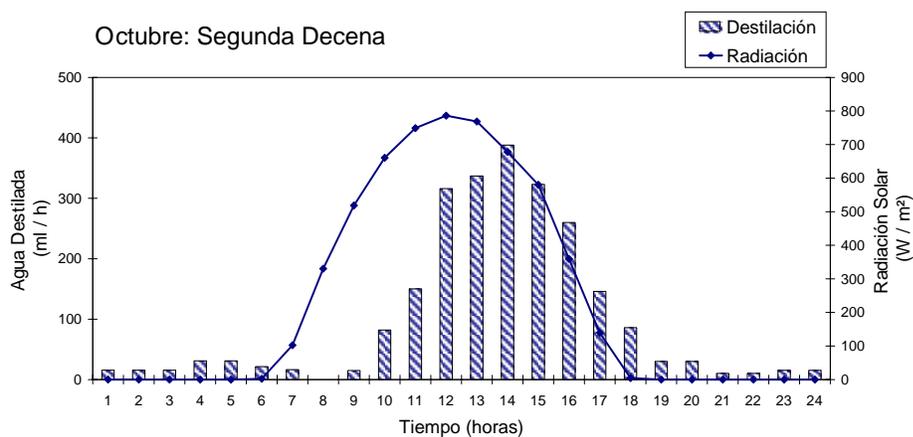


Figura 20

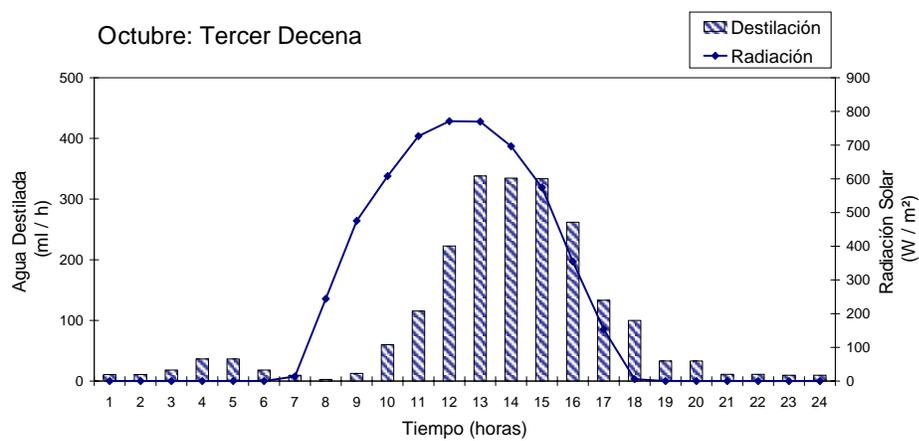


Figura 21

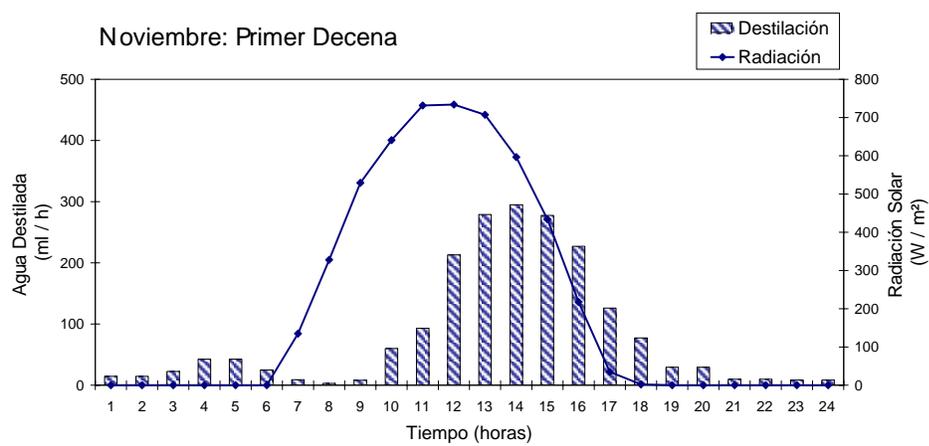


Figura 22

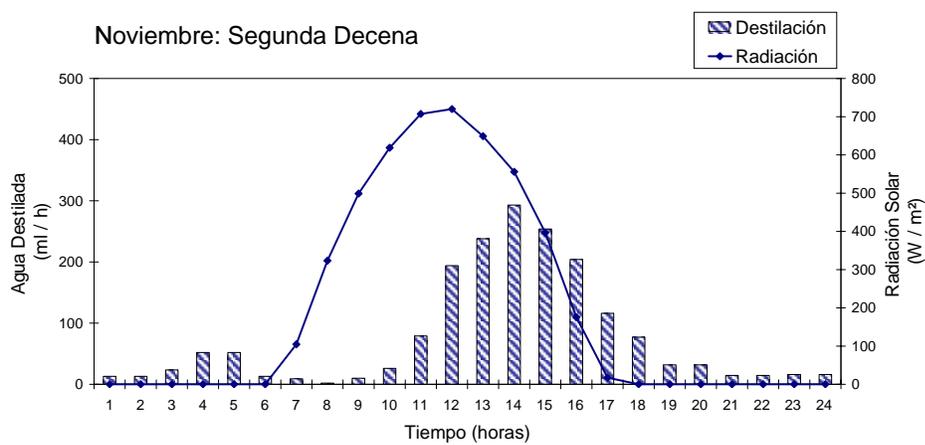


Figura 23

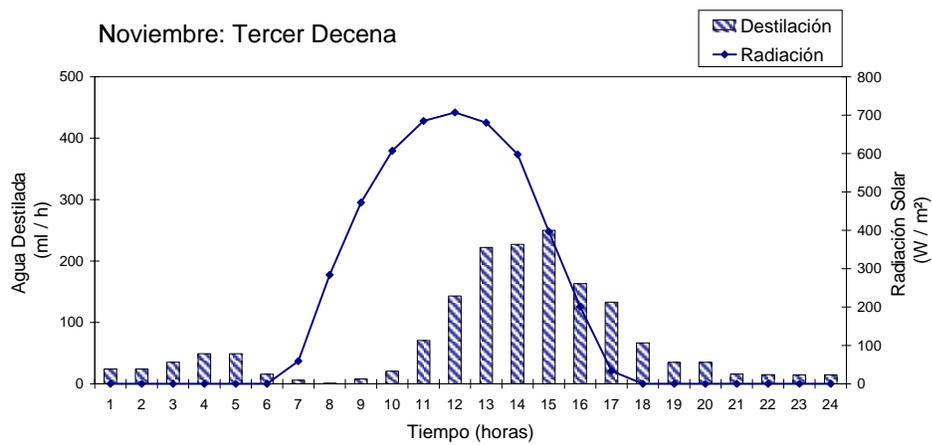


Figura 24

## Capítulo 4

# Simulación del funcionamiento de un destilador solar

En el capítulo: Principios básicos de transferencia de calor y masa, se derivaron las ecuaciones de transferencia de calor de los procesos que describen el funcionamiento de un destilador solar. En el capítulo presente se utilizarán estas ecuaciones para construir un modelo computacional detallado de un destilador solar. Este modelo se enfoca en el balance de energía entre la radiación incidente y la transferencia de calor a través de la base y la cubierta transparente del destilador. Se asume que la transferencia de calor a través de las paredes del destilador es mínima y por lo tanto no se incluye en el modelo. Esto permite que se analice la geometría del destilador como si estuviese compuesto por dos placas paralelas infinitas, lo que simplifica considerablemente los cálculos. Lo asumido es válido siempre y cuando las paredes del destilador sean buenos aislantes térmicos.

## 4.1 Acoplamiento de ecuaciones de transferencia de energía y masa

Con el objetivo de construir un modelo dinámico del destilador solar, podemos considerar que hay dos interfaces: 1) la cubierta transparente y 2) la base del destilador; que una vez conociendo su estado podemos caracterizar todo el sistema. Las temperaturas de estas interfaces, así como la temperatura ambiente y la de la bóveda celeste, son las que van a determinar los flujos de calor, tanto dentro del destilador, como entre el destilador y el medio ambiente. También existen otros dos flujos de calor que son independientes de las temperaturas, pero que están determinados respectivamente por la cantidad de radiación solar absorbida en cada una de estas dos interfaces. Conociendo todos los flujos de calor, se puede calcular cuales van a ser los cambios netos en las temperaturas de estas dos interfaces y por lo tanto los cambios consecuentes de todos los flujos de calor. A través de este proceso iterativo, es como se puede modelar el estado dinámico del destilador solar.

El proceso iterativo está dado simplemente por el acoplamiento de una ecuación diferencial de transferencia de energía que describe la cubierta transparente y una ecuación diferencial que describe la base del destilador.

La ecuación de transferencia de energía en la cubierta transparente del destilador se puede escribir como:

$$M_c \frac{dT_c}{dt} = \text{energía entrante} - \text{energía saliente} \quad (4.1)$$

donde:

energía entrante = radiación solar absorbida + radiación infrarroja de la base  
+ convección de calor de la base + calor latente por condensación de agua  
energía saliente = radiación emitida al espacio + convección de calor perdido a la atmósfera

La ecuación de transferencia de energía en la base del destilador se puede escribir como:

$$M_w \frac{dT_w}{dt} = \text{energía entrante} - \text{energía saliente} \quad (4.2)$$

donde:

energía entrante = radiación solar absorbida  
energía saliente = radiación infrarroja a la cubierta + convección de calor a la cubierta  
+ calor latente por evaporación de agua + conducción de calor al exterior

Haciendo uso de las relaciones de transferencia de calor derivadas en el capítulo: Principios básicos de transferencia de calor y masa, las ecuaciones 4.1 y 4.2 se pueden reescribir respectivamente como:

$$M_c \frac{dT_c}{dt} = [a_c I] + [\epsilon_w \sigma (T_b - T_g^4)] + [(T_b - T_g) h_c] + [0.0163 (T_b - T_g) R_1 h_c] \\ - [\epsilon_c \sigma (T_c^4 - T_s^4)] - [(2.8 + 3v) (T_c - T_a)]$$

$$M_w \frac{dT_w}{dt} = \left[ a_b I \frac{U_b}{h_b} + a_w I \right] - [\epsilon_w \sigma (T_b - T_g^4)] - [(T_b - T_g) h_c] \\ - [0.0163 (T_b - T_g) R_1 h_c] - [U_b (T_b - T_a)]$$

Estas dos ecuaciones se puede resolver fácilmente con ayuda del programa Matlab, utilizando la herramienta de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODE, por sus siglas en Inglés) para ecuaciones no-rígidas llamada *ode23*. Esta herramienta está basada en el par (2,3) explícito de Runge-Kutta descrito por Bogacki y Shampine (Bogacki 1989).

## 4.2 Descripción de la simulación

Escribí un código en el programa Matlab para resolver las ecuaciones diferenciales que caracterizan al destilador solar, con el objetivo de poder simular su funcionamiento a partir de ciertas condiciones ambientales como la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente. El código de la simulación se divide en las siguientes secciones:

### 4.2.1 Características físicas del destilador solar

En esta sección se definen las dimensiones del destilador, las propiedades físicas de los materiales que lo componen (e.g. capacidad calorífica, coeficiente de absorción, emisividad, etc...).

### 4.2.2 Variables meteorológicas

El código extrae estas variables meteorológicas de una tabla de datos espaciados en cuatro columnas: tiempo (s), radiación solar ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) y velocidad del viento (m/s). La tabla está formada por datos medidos cada hora. Estos datos se obtuvieron del Observatorio Meteorológico de La Paz, B.C.S. y de el sitio de internet de Ameriflux (ver bibliografía: Ameriflux). Los datos son interpolados con una

aproximación cúbica para generar información a cada segundo que se utiliza para resolver las ecuaciones diferenciales.

### **4.2.3 Constantes físicas universales**

### **4.2.4 Ecuaciones de transferencia de calor y masa para el destilador solar**

En esta parte del código se definen las ecuaciones de transferencia de calor entre distintos elementos del destilador y el medio ambiente. Las ecuaciones se escriben en base a los resultados derivados en el capítulo: Principios básicos de transferencia de calor y masa.

### **4.2.5 Ecuación diferencial**

Aquí se escriben dos ecuaciones diferenciales, una para el caso en el que la temperatura de la cubierta del destilador es más alta que la temperatura de la base y otra para el caso contrario. En el primer caso se suprime el efecto de convección y el de transporte de masa, y la transferencia de calor va en dirección de la cubierta a la base. En el segundo caso se incluye el efecto de convección y la transferencia de masa de la base hacia la cubierta del destilador.

### **4.2.6 Condiciones para resolver ecuación**

En esta sección se selecciona el método *ode23* para resolver las ecuaciones diferenciales y se determina el error máximo tolerado. Cuando este último es muy pequeño (menor a  $10^{-5}$ ) los resultados son mucho más nítidos, pero también aumenta considerablemente el tiempo necesario para llevar a cabo la simulación. Al seleccionar el método para resolver las ecuaciones, también se tiene que elegir el periodo de tiempo por el cual se va a correr la

simulación y se tienen que dar las condiciones iniciales de las temperaturas de la cubierta y base del destilador.

#### **4.2.7 Datos de salida**

Los datos generados por la simulación son: la temperatura de la base, la temperatura de la cubierta y la producción de agua del destilador a cada paso de integración. La variable que realmente nos interesa es la de la producción de agua. Como el paso de integración es variable, resulta mucho más conveniente generar una serie de datos a cada hora con esta variable. Para lograr esto, se hace una interpolación cúbica que saca el valor de la producción de agua para cada hora del periodo de tiempo por el cual se corre la simulación. Con estos datos se crea una tabla en formato ".xls" que se puede leer con el programa de computación de Microsoft Excel.

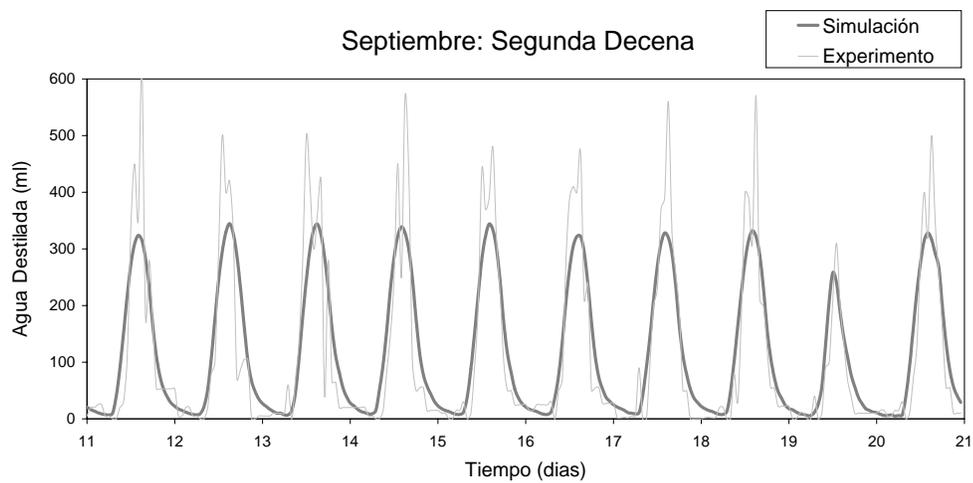
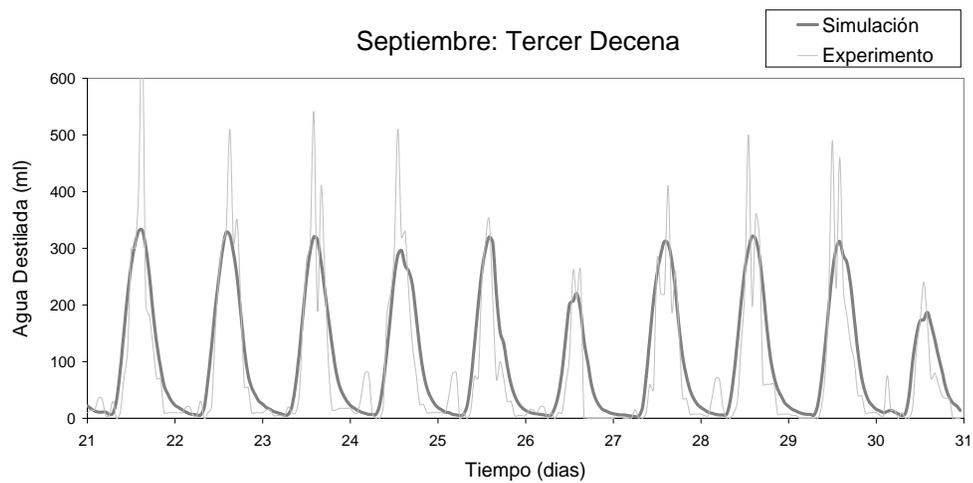
### **4.3 Resultados de la simulación**

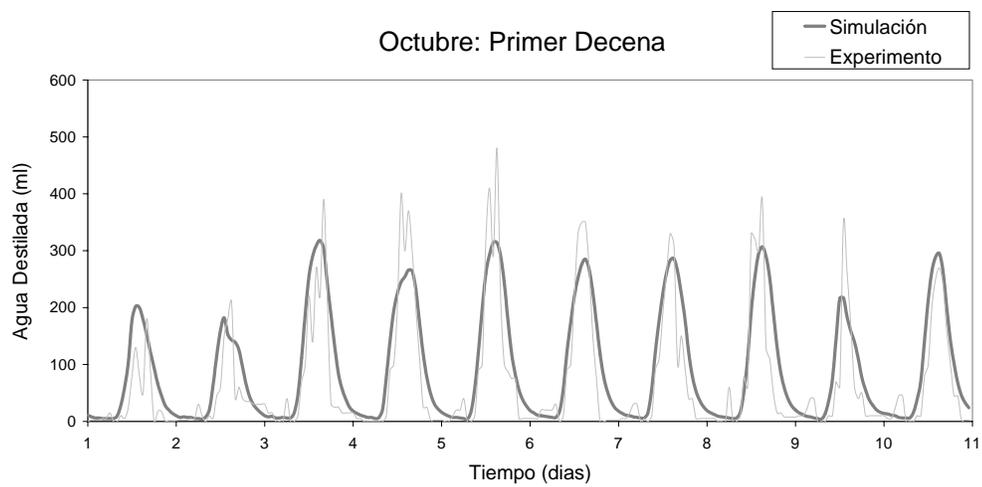
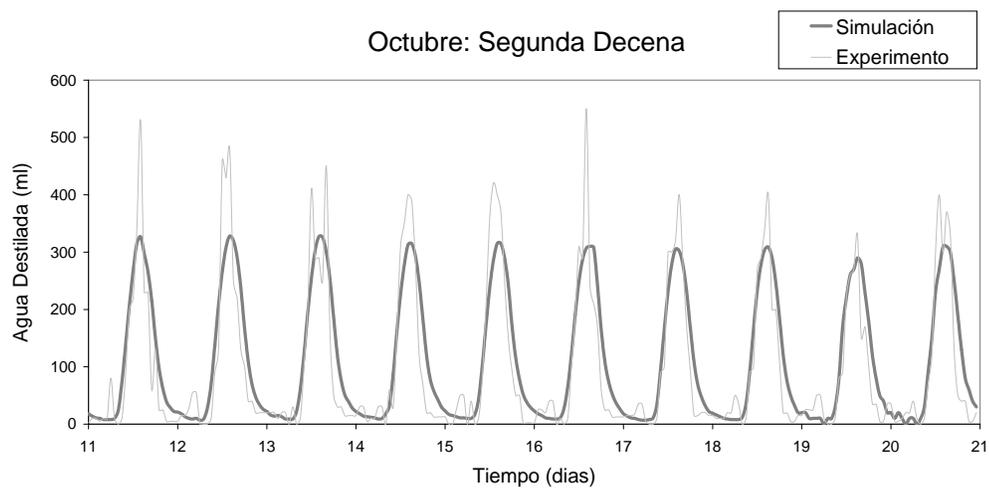
#### **4.3.1 Simulación y experimento**

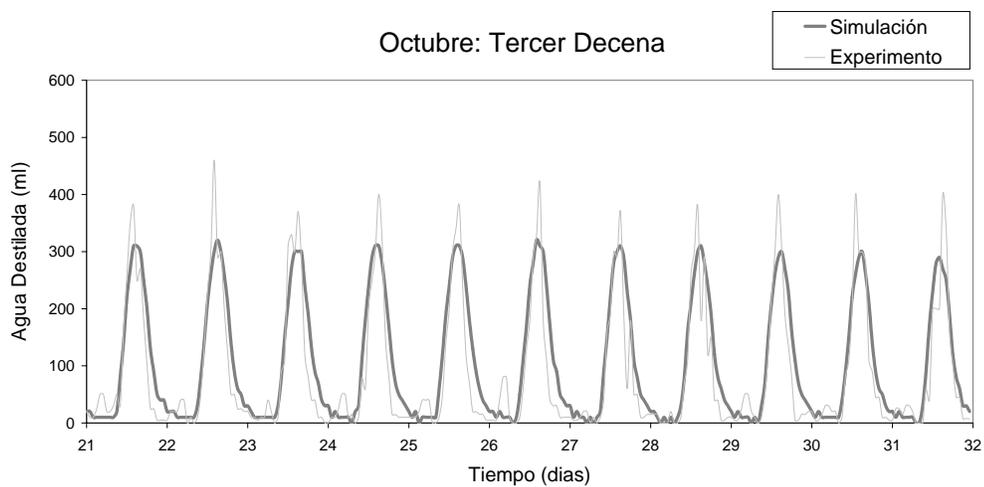
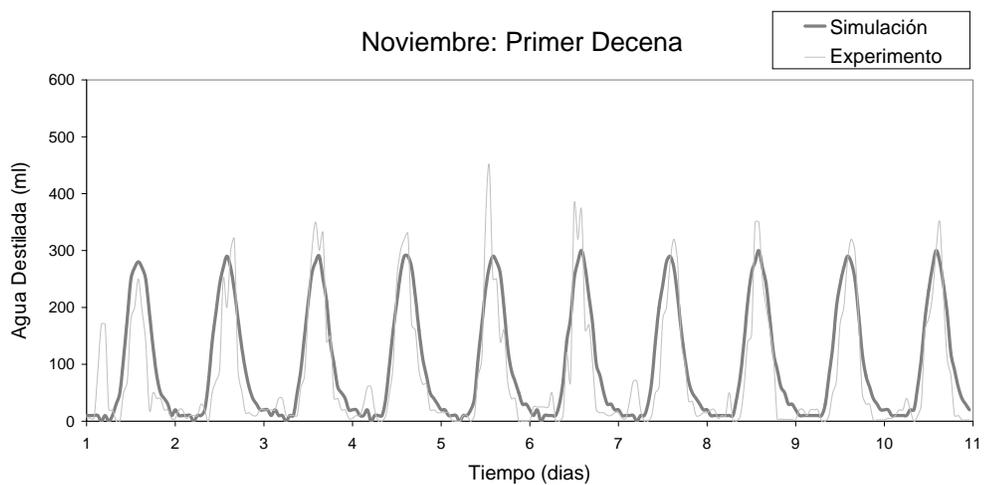
Una vez que se tiene un código de simulación que produce los datos de salida en el formato deseado, entonces se tiene que validar comparando sus resultados con los de un experimento real. Para este trabajo de investigación lo que se hizo fue comparar la producción de agua del destilador instalado en el Observatorio Meteorológico de La Paz con los resultados de una simulación de un destilador sometido a las mismas condiciones meteorológicas. Esto es, se utilizaron los datos de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar medidos en el mismo observatorio como datos de entrada para la simulación.

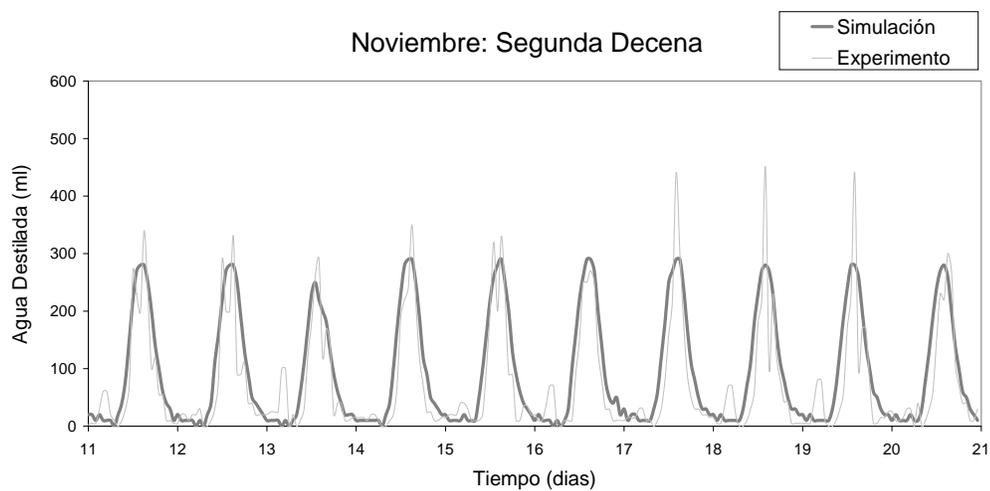
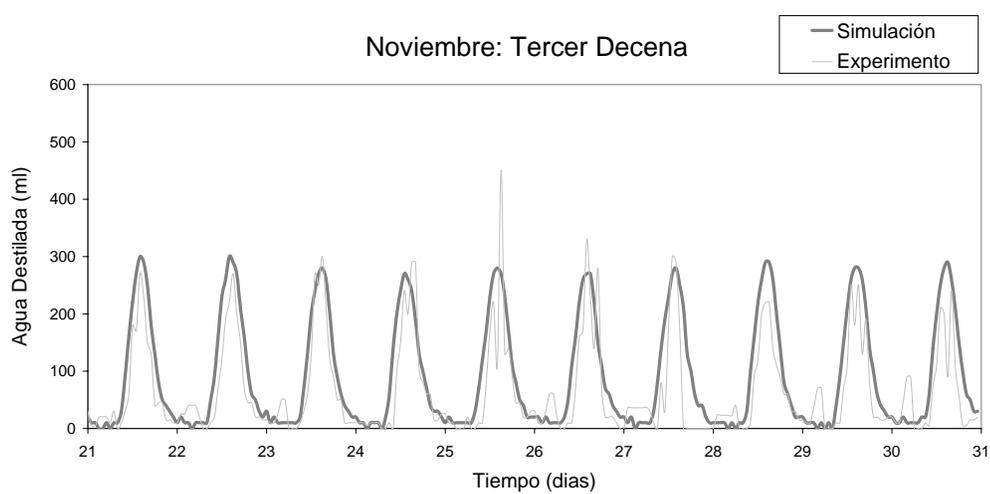
Los resultados de la simulación y del experimento para los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2005, se muestran en las figuras 25 a 32. A lo largo de los 81 días que corrió el experimento y la simulación, se puede apreciar que hay una gran correlación entre los dos. Los datos experimentales, como ya se había comentado en el capítulo anterior, tienen un ruido aleatorio significativo entre hora y hora. Esto en gran parte se debe a que el agua del destilador escurre por la manguera de desagüe en cantidades discretas, esto es, se tiene que juntar cierta cantidad para que pueda escurrir. También, en las gráficas se puede apreciar como sistemáticamente los resultados del experimento son más altos que la simulación a la mitad del día cuando la producción se encuentra al máximo, y los resultados de la simulación son ligeramente más altos que los del experimento durante las tardes, noches y mañanas.

Integrando ambas curvas se encuentra que a lo largo de estos 81 días, la simulación produjo 195.5 litros y el experimento 164.7 litros, o sea una diferencia porcentual de 15.8%.

*Figura 25**Figura 26*

*Figura 27**Figura 28*

*Figura 29**Figura 30*

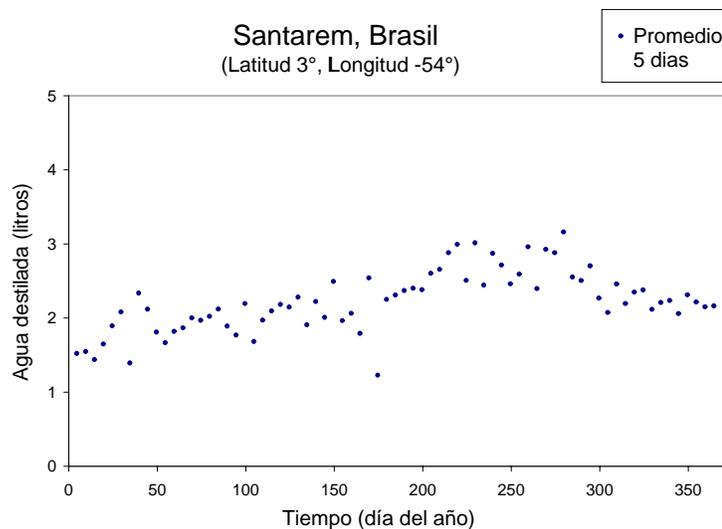
*Figura 31**Figura 32*

### 4.3.2 Estimación de producción en distintas regiones geográficas

Ya que el código de simulación se ha sido validado con resultados experimentales, entonces se puede utilizar para investigar la eficacia de los destiladores en distintas zonas geográficas. Para realizar esto, se consiguieron datos meteorológicos de tres sitios del proyecto Ameriflux (ver bibliografía: Ameriflux): Santarem, Brasil; Arizona, EEUU; Tennessee, EEUU. Los datos son mediciones de temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar para cada hora de un periodo de un año. Como los resultados de la simulación variaban considerablemente de un día a otro, ya que las condiciones meteorológicas cambian continuamente (en especial la nubosidad), se hicieron promedios de la producción de agua para cinco días continuos. No se promediaron más días por que seria difícil de esperarse que una familia que este usando un destilador pueda guardar agua por más de cinco días continuos.

#### **Santarem, Brasil**

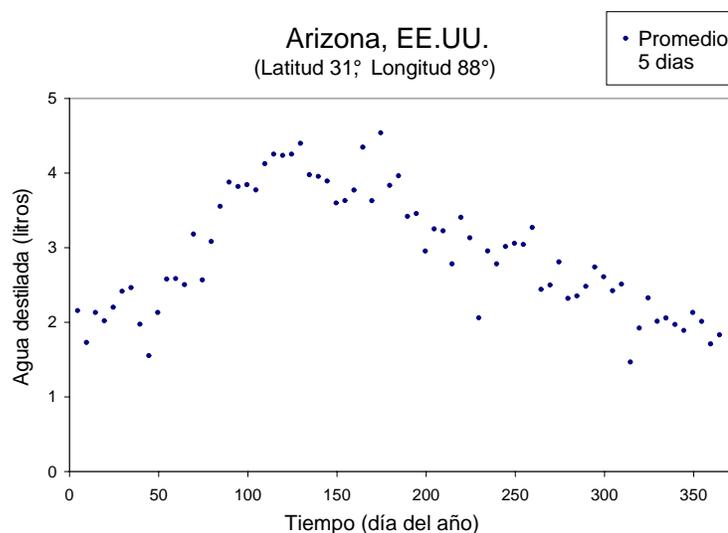
El promedio anual de producción de agua es alrededor de 2 litros por día. La variación en producción es muy pequeña, solo entre 1.5 y 3 litros por día, excepto por una ocasión que la producción baja hasta casi 1.1 litros por día. La producción es relativamente baja debido a la alta nubosidad que caracteriza la región durante casi todo el año. La cercanía al ecuador es la responsable de la poca variación.



*Figura 33*

### **Arizona, EEUU**

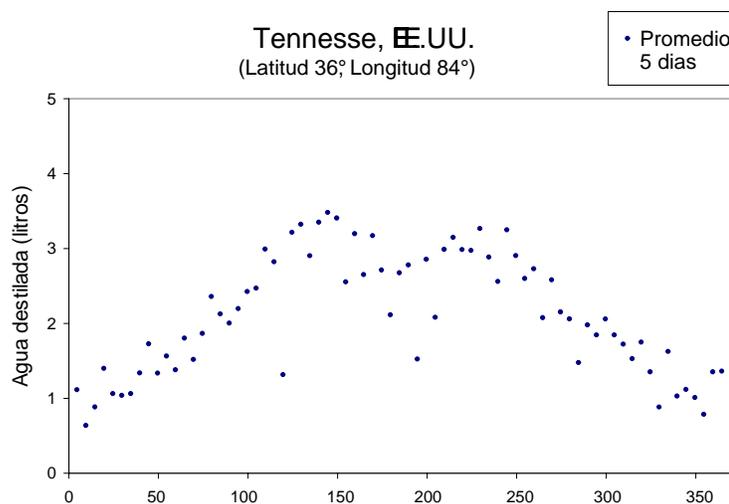
El promedio anual de producción de agua es de casi 3 litros al día. La variación es drástica entre el invierno a 1.5 litros al día y el verano a 4.5 litros al día. Es interesante observar como la producción aumenta rápidamente durante la primavera y encuentra un máximo antes del solsticio de verano. A partir de este último, la producción de agua disminuye gradualmente hasta llegar a un mínimo en el solsticio de invierno.



*Figura 34*

### Tennessee, EEUU

El promedio anual de producción de agua es de 2 litros al día. Varía mucho la producción entre el invierno a 0.8 litros al día y el verano a 3.5 litros al día. La producción de agua aumenta gradualmente conforme sale el invierno y pasa la primavera. Al iniciar el verano alcanza un máximo de producción, luego disminuye y vuelve a subir para encontrar otro máximo al final del verano. Este doble pico simétrico se debe a que justo a la mitad del verano hay muchos días nublados que reducen la producción de agua considerablemente.



*Figura 35*

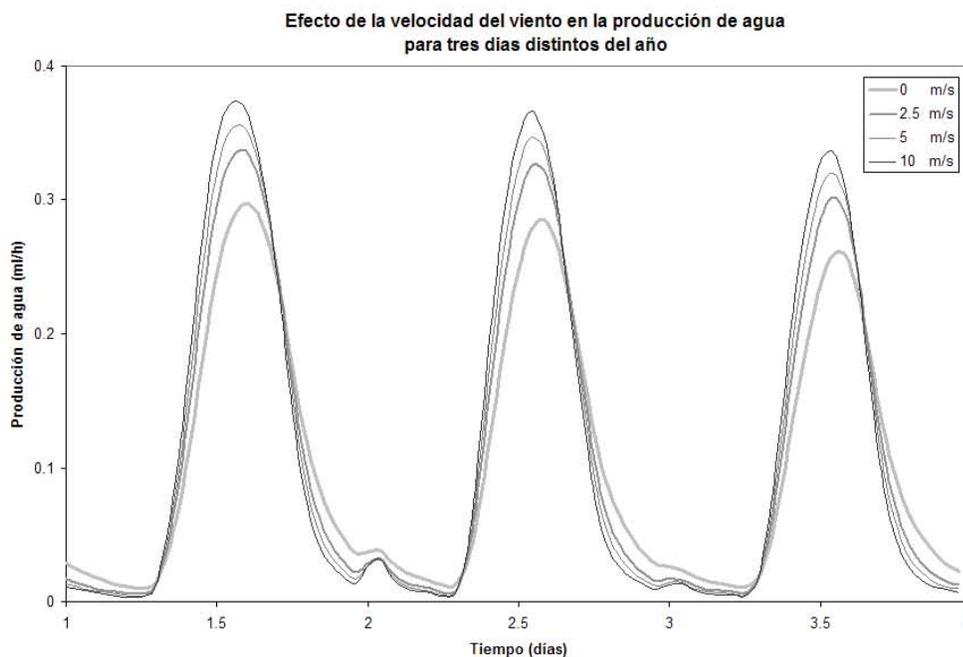
Como una línea de investigación para un futuro proyecto, se podría utilizar este mismo código de simulación para generar mapas mostrando el desempeño de un destilador solar estándar para cada región geográfica en las distintas estaciones del año. Esto ayudaría a identificar regiones donde los destiladores se pueden utilizar como una fuente viable de producción de agua potable.

### 4.3.3 Efecto del viento en la destilación

Motivado por la ambigüedad en la literatura sobre el efecto del viento en la producción del agua de los destiladores solares, decidí llevar a cabo un sencillo experimento con el código de simulación para tratar de entender mejor este fenómeno. Se creó una serie de datos meteorológicos con tres días característicos del verano, otoño e invierno en

La Paz, B.C.S., con el fin de ver el efecto del viento a distintas temperaturas y regímenes de radiación solar. Luego se corrió la simulación con esta serie a cuatro velocidades de viento distintas: 0, 2.5, 5 y 10 m/s. El resultado muestra que cuando la radiación solar es alta, una mayor velocidad del viento induce una mayor producción de agua, pero durante las tardes y noches, bajo un cierto nivel de radiación solar, una mayor velocidad del viento reduce la producción de agua. Los procesos físicos responsables por estos efectos son: 1) cuando la radiación es alta, se calienta considerablemente la cubierta del destilador inhibiendo la condensación en ella, sin embargo una alta velocidad de viento puede ayudar a remover el exceso de calor en la cubierta y facilitar la condensación; 2) cuando la radiación es baja, la pérdida de calor debido al viento se lleva la poca energía que hay y que de otra forma se utilizaría para destilar más agua. Tomando en cuenta estos dos efectos, la producción de agua es proporcional a la velocidad del viento, o sea que altas velocidades de viento pueden aumentar la producción de agua.

La razón por la cual existe una controversia en la literatura, es porque se presentan datos una relación negativa entre la velocidad del viento y la producción del agua. Sin embargo esta relación no es causal, si no un resultado de que comúnmente las tardes (baja radiación solar) y las bajas temperaturas están correlacionadas positivamente con la velocidad de viento.



*Figura 36*

## 4.4 Discusión

Los resultados de la simulación muestran la capacidad de predecir, por lo menos dentro de un 16% de precisión, la producción de agua de un destilador solar. La pequeña diferencia entre la simulación y los resultados experimentales, se debe principalmente a que se asumió en la simulación que la pérdida de calor a través de las paredes del destilador era nula. Sin embargo, las paredes del destilador están compuestas de una delgada capa de fibra de vidrio que no aísla muy bien el interior del destilador del medio ambiente. Esto resulta en una eficiencia mayor errónea para el destilador simulado. Para lograr que

coincidan mejor la simulación y los resultados del experimento, se pueden cubrir las paredes del destilador con una capa de unicel u otro material aislante.

Como se observó con las gráficas generadas para las tres localidades geográficas distintas, la simulación computacional promete ser una herramienta útil para identificar regiones donde los destiladores solares pueden jugar un papel importante en resolver problemas de escasez de agua fresca. La simulación computacional también puede ser utilizada para entender mejor como se afecta la eficacia de los destiladores solares con distintas condiciones meteorológicas, como temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento. Estos resultados se pueden utilizar para mejorar la eficacia de los destiladores solares, optimizando su diseño para las condiciones de la región donde será instalado.

## Apéndice A

# Código de simulación

La simulación se escribió en dos archivos. El primer archivo "solstill\_ode.m" llama a los datos de entrada, contiene las constantes físicas del problema y la ecuación diferencial. El segundo archivo "solstill.m" llama a la ecuación diferencial, define de donde a donde se resuelve, define los valores iniciales y genera una tabla de datos con formato ".xls".

### A.1 Nombre del archivo: "solstill\_ode.m"

```
%definir ecuaci\U{f3}n
function dydt = solstill_ode(t,y)

% 1) Características físicas del destilador solar.
ac = 0.05;      % coeficiente de absorcion relativa de la cubierta
aw = 0.05;      % coeficiente de absorcion relativa del agua
ab = 0.60;      % coeficiente de absorcion relativa de la base

ec = 0.9;      % emisividad de la cubierta
ew = 0.9;      % emisividad del agua
```

```

Mc = 5226;      % capacidad calor\U{ed}fica de la cubierta (J/m^2/K)
Mw = 57600;    % capacidad calor\U{ed}fica del agua (J/m^2/K) (1.4cm de prof.)

Ub = 0.7686;   % coeficiente de conduccion (W/m^2/K)
K = 0.04;      % (W/m^2/K)
hi = 6.2472;   % (W/m^2/K)
l = 0.05;      % (m)
hb = 1/((1/K)+(1/hi)); % (W/m^2/K)

kf = 0.025;    % conductividad termica del aire (W/m/K)
xl = 0.2;      % distancia entre cubierta y agua (m)

R1 = 199.0566; % (N/m^2/K)
R2 = -1.41085*10^4; % (N/m^2)
hw = 2260*10^3; % (J/kg)

% 2) Variables meteorologicas.
load 'meteodata.txt' %cargar datos meteorologicos

%radiacion solar
SolRad = interp1(meteodata(:,3),meteodata(:,1),t,'cubic');
%temperatura ambiente
Ta = 273 + interp1(meteodata(:,3),meteodata(:,2),t,'cubic');
% temperatura de la boveda celeste (K)
Ts = Ta - 20;
%velocidad del viento
v = interp1(meteodata(:,4),meteodata(:,3),t,'cubic');

% 3) Constantes fisicas universales.
S = 5.67*10^(-8); % constante stefan boltzman

% y(1) = temperatura del agua
% y(2) = temperatura de la cubierta

% 4) Ecuaciones de transferencia de calor y masa para el destilador solar
solrad_sw = ab*SolRad*Ub/hb + aw*SolRad;
solrad_sc = ac*SolRad;

evap_wc = 0.016273*R1*0.884*((y(1)-y(2))^(4/3))*(((2.687*10^5)-R2)
/(((2.687*10^5)-R1*y(1)-R2))^(1/3));

```

```

conv_wc = 0.884*((y(1)-y(2))^(4/3))*(((2.687*10^5)-R2)
        /((2.687*10^5)-R1*y(1)-R2))^(1/3));

cond_cw = kf/xl;
cond_wa = Ub*(y(1)-Ta);

rad_wc = ew*S*(y(1)^4-y(2)^4);
rad_cw = ew*S*(y(2)^4-y(1)^4);
% Nota: usa emisividad del agua porque la cubierta tiene capa de agua
rad_ca = ec*S*(y(2)^4-Ts^4);

wind = (2.8+3*v)*(y(2)-Ta);

prod_w = evap_wc/hw;

% 5) Ecuacion diferencial
if y(2)>y(1)
    % temperatura de la cubierta es mas alta => no conveccion
    dydt = [(solrad_sw-cond_wa+cond_cw+rad_cw)/(Mw);
            (solrad_sc-cond_cw-rad_ca-rad_cw-wind)/(Mc); 0];
else
    % temperatura del agua mas alta, caso normal
    dydt = [(solrad_sw-cond_wa-evap_wc-conv_wc-rad_wc)/(Mw);
            (solrad_sc+evap_wc+conv_wc-rad_ca+rad_cw-wind)/(Mc); prod_w];
end

```

## A.2 Nombre del archivo: "solstill.m"

```

% 6) Condiciones para resolver ecuacion
% definir error tolerado maximo
options = odeset('reltol',1e-5);

% resolver y() usando ode23
% [tiempo(0) a tiempo(f)],[valores iniciales y(1);y(2);y(3)]
[t,y] = ode23(@solstill_ode,[0 342000],[301;300;0]);

% 7) Datos de salida
% interpolar cada hora
hora = 0:3600:342000;

```

```
waterprod = interp1(t,y(:,3),hora,'cubic');  
  
% crear tabla en formato .xls  
M = [hora; waterprod];  
csvwrite('datosimu.xls',M);
```

# Bibliografía

- Ameriflux <http://public.ornl.gov/ameriflux/index.html>  
[http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/data\\_system/aamer.html](http://cdiac.esd.ornl.gov/programs/ameriflux/data_system/aamer.html)
- Ayllón 1996 Ayllón, T., *Elementos de meteorología y climatología*.  
 Trillas, México, D.F., 1996.
- Bogacki 1989 Bogacki, P. and L. F. Shampine, *A 3(2) pair of Runge-Kutta formulas*  
 Applied Math. Letters, Vol. 2, pp 1-9, 1989.
- Cortés 2001 Cortés J. et al. *Seguimiento de vibrio cholerae 01 e identificación de*  
*bacterias enteropatógenas y oportunistas*, IMTA, 2001.
- Duffie 1980 Duffie J., *Solar Engineering of Thermal Processes*,  
 John Wiley and Sons, 1980.
- Dunham 1978 Dunham D., *Fresh Water from the Sun, Family-Sized Solar Still*  
*Technology: A Review and Analysis*, USAID, 1978.
- Dunkle 1961 Dunkle R., *Solar Water Distillation*, Heat Transfer Conference,  
 University of Colorado, 1961.
- Hanson 2004 Hanson A., et al., *Distillate water quality of a single-basin solarstill:*  
*laboratory and field studies*, Solar Energy 76, 635–645, 2004.
- INFRA <http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>
- Janna 2000 Janna W., *Engineering Heat Transfer*, CRD Press, 2000.
- NASA <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- NREL [http://rredc.nrel.gov/solar/old\\_data/nsrdb/hourly/](http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/hourly/)  
<http://www.nrel.gov/midc/solpos/> (solar calculator)
- Malik 1982 Malik M., et al., *Solar Distillation*, Pergamon Press, 1982.
- OMM Organización Meteorológica Mundial  
<http://www.wmo.ch/index-sp.html>
- SMN Servicio Meteorológico Nacional. *Instrumental Meteorológico y*  
*Métodos de Observación*. Comisión Nacional del Agua, México D.F.
- Sodha 1980 Sodha M., et al., *Transient Analysis of Solar Still*, Energy Conservation  
 and Management, 1980.
- WHO 2000 *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report*.  
[www.who.int/water\\_sanitation\\_health/Globalassessment/GlobalTOC.htm](http://www.who.int/water_sanitation_health/Globalassessment/GlobalTOC.htm)



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**ACT. MAURICIO AGUILAR GONZÁLEZ**  
**Jefe de la División de Estudios Profesionales de la**  
**Facultad de Ciencias**  
**Presente**

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo escrito:

"Experimentación, simulación y análisis del proceso de destilación de agua con energía solar"

realizado por Reygadas Robles Gil Fermín

con número de cuenta 09958578-1 , quien cubrió los créditos de la carrera de: Física

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis

Propietario Dra. Martha Rosete Aguilar

*Rosete Aguilar Martha*

Propietario Dr. Augusto García Valenzuela

*Augusto Garcia V.*

Propietario Dr. Daniel Kammen

*Daniel M. Kammen*

Suplente M. en C. Ignacio Campos Flores

*Ignacio*

Suplente M. en C. Mirna Villavicencio Torres

*Mirna Villavicencio Torres*

**Consejo Departamental de Física**



*Alicia Zarzosa Pérez*

M. EN C. ALICIA ZARZOSA PEREZ

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA