



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA VARIACIÓN EN
LA PRODUCCIÓN DE UN DESTILADOR SOLAR
ORIENTABLE**

TESIS
Que para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO
presenta

Miguel Ángel Aldana García

Director: Dr. Miguel Ángel Porta Gándara

MÉXICO D.F.

2002



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACION DISCONTINUA



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/526/01

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: ALDANA GARCIA MIGUEL ANGEL
P r e s e n t e .

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	I.Q. Rafael Sánchez Dirzo
Vocal:	Dr. Miguel Angel Porta Gándara
Secretario:	I.Q. Roberto Ramírez Torres
Suplente:	I.Q. Dominga Ortíz Bautista
Suplente:	I.Q. Bernardo Carreón Calderón

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A t e n t a m e n t e

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D. F., 28 de Agosto del 2001.

EL JEFE DE LA CARRERA

I.Q. ARTURO B. MENDEZ GUTIERREZ

SECRETARIA TECNICA

Con todo el cariño del mundo a mis padres y hermanos por su invaluable apoyo, y a todos las personas que de alguna manera me apoyaron durante mis años de estudio

A todos mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Miguel Ángel Porta Gándara agradezco el apoyo por su colaboración como director de esta tesis.

Al Ing. Eduardo Rubio agradezco su ayuda por permitirme utilizar el destilador así como los instrumentos de medición.

ÍNDICE

Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	IV
Resumen	V
Introducción	1
1. Antecedentes	4
2. Fundamento teórico	7
2.1. Principios físicos de la radiación solar	7
2.1.1. El Sol	7
2.1.2. Flujo primario	8
2.1.2.1. Generación	8
2.1.2.2. Distribución	9
2.1.3. Flujo secundario	9
2.2. Estimación teórica de la radiación solar	10
2.3. Técnicas de medición de la radiación solar	13
2.3.1. Pirheliómetro	13
2.3.2. Piranómetros	13
2.3.3. Variación de la energía solar	14
2.4. Conceptos básicos de transferencia de calor	15
2.4.1. Radiación	15
2.4.1.1. Espectro electromagnético	16
2.4.1.2. Propiedades de la radiación térmica	17
2.4.1.3. Coeficiente de transferencia de calor por radiación	18
2.4.2. Convección	20
2.4.3. Convección libre	23
2.4.3.1. Números adimensionales	24
2.4.4. Coeficiente de convección debido al viento	27
2.4.5. Transferencia simultánea de calor y masa	27
3. Destilación solar	29
3.1. Destiladores solares	29
3.2. Principios de destilación solar	35
3.3. Transferencia de calor en destiladores solares	37
3.4. Otras aplicaciones de la energía solar	41
4. Desarrollo experimental	43
4.1. Planteamiento del problema	43
4.2. Objetivos	43

4.3. Hipótesis	44
4.4. Equipos y materiales	44
4.5. Metodología	47
4.6. Resultados	51
5. Discusión de resultados	63
6. Conclusiones y recomendaciones.	73
Nomenclatura	75
Bibliografía	77
Anexo I Programa de computo	79
Anexo II Definiciones	90

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1 Variación de la radiación solar para La Paz B.C.S.	14
2.2 Espectro electromagnético	17
3.1 Destilador solar somero	30
3.2 Destilador de múltiple efecto por difusión	32
3.3 Destilador solar inclinado	35
3.4 Elementos principales del balance térmico en un destilador solar	37
4.1 Dimensiones externas del destilador solar	45
4.2 Vista de los módulos y sistemas de adquisición de datos	48
4.3 Montaje experimental utilizado	48
4.4 Orientaciones del destilador a las que se llevaron a cabo las pruebas	50
4.5 Producción instantánea ($\text{kg}/\text{m}^2\text{-h}$) para el 20 de marzo	52
4.6 Temperaturas del ambiente, cubiertas, fondo y agua	53
4.7 Velocidad de viento a lo largo del día	54
4.8 Datos de producción y radiación solar para los días 25 y 26 de abril	55
4.9 Temperaturas del destilador y del ambiente	56
4.10 Velocidad de viento para los días 25 y 26 de abril	57
4.11 Radiación solar y producción para el día 24 de mayo	59
4.12 Temperaturas en el destilador y temperatura ambiente	59
4.13 Datos de velocidad de viento del día 24 de mayo	60
4.14 Producción instantánea radiación solar para el día 6 de junio	61
4.15 Temperatura del destilador y ambiente	61
4.16 Registro de la velocidad del viento para el día 6 de junio	62
5.1 Diferencia de temperatura entre fondo y agua	66
5.2 Eficiencias del evaporador y placas condensadores para cada una de las orientaciones	70
5.3 Eficiencias del evaporador y condensadores en conjunto.	71
Al.1 Gráficas de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento	87
Al.2 Variaciones en la producción por efecto de la hora de recarga de salmuera	88
Al.3 Caída de la producción cuando se recarga el destilador a las 15 horas	88
AII.1 (a) y (b) vista de los diferentes ángulos	94
AII.2. Diferentes ángulos solares y para una superficie inclinada	94

ÍNDICE DE TABLAS

5.1 Producción nocturna

5.2 Porcentaje de producción nocturna

5.3 Valores diarios de producción total, de cada uno de los condensadores, energía recibida por el destilador y entalpía de evaporación

5.4 Eficiencia del evaporador y condensadores

5.5 producción en $\text{kg/m}^2\text{-día}$ del evaporador y de los dos condensadores en conjunto

5.6 Eficiencia del evaporador, y condensadores en conjunto

RESUMEN

En esta tesis se reporta el trabajo experimental para medir las variaciones en la producción de agua destilada de un destilador solar de doble pendiente, con una área de evaporación de 8.8 m^2 . El ángulo de inclinación de los condensadores es de 45° . Se efectuaron cuatro corridas experimentales con diferente orientación cada una. Por medio de un análisis de eficiencias se encontró que la orientación NO-SE es la que presenta la eficiencia más alta con un valor de 0.36 y el condensador con orientación SE tiene el valor más alto de eficiencia, 0.50.

Se reporta el desempeño de cada uno de los condensadores, para las diferentes orientaciones, encontrando que es en ellos donde más se aprecia el efecto de la orientación en la producción.

Se presenta también un programa de computo con el cual se pueden observar los efectos en la producción ocasionados por inadecuadas prácticas de operación durante la recarga de salmuera al destilador. Se observa claramente que recarga el destilador al medio día representa sólo el 87.34% de la máxima producción que se obtiene cuando se carga el destilador a las 5 de la mañana. Por lo que la operación de recarga del destilador es una operación crítica ya que esto se refleja directamente en el buen funcionamiento del destilador.

INTRODUCCIÓN

El agua es una necesidad básica para la supervivencia del ser humano. El hombre ha dependido de ríos, lagos y aguas subterráneas para satisfacer los requerimientos en la vida cotidiana, agricultura e industria. Sin embargo, debido al rápido crecimiento industrial y de la población no siempre es posible obtener el agua suficiente que demandan. Adicional a esto tenemos la contaminación de ríos y lagos debido a la gran cantidad de desechos que la industria vierte en ellos.

Existen además regiones en las cuales debido a sus condiciones climáticas el agua es un recurso muy escaso, donde no solamente hay que satisfacer la necesidad de agua para uso doméstico sino también para la agricultura.

Los océanos son la única fuente inagotable de agua, desafortunadamente, su alta salinidad la hace inviable para el consumo humano. Es por ello que la destilación de agua de mar es una de las mejores alternativas para llevar agua a regiones donde este recurso esta muy limitado.

Existen diferentes métodos de destilación, pero la mayoría de las plantas de destilación requieren de grandes cantidades de energía, ya sea eléctrica y/o combustibles fósiles para su operación. Debido al rápido crecimiento en el costo de combustibles, la destilación solar es un método muy atractivo, además, la tecnología involucrada es relativamente simple.

Las condiciones climáticas en Baja California Sur hacen que el agua potable sea un recurso muy escaso. La gran cantidad de radiación solar la mayor parte del

año y por su condición de península hace la destilación solar de agua de mar muy atractiva. Si se considera que Baja California Sur es el estado menos poblado de la República, la implementación de estos sistemas en pequeñas comunidades es una opción viable, ya que se obtiene energía sin ningún costo la mayor parte del año.

Es por ello, que los esfuerzos enfocados a un mejor entendimiento de la destilación solar, no son esfuerzos en vano, ya que contribuyen al desarrollo de una tecnología barata que puede contribuir a mejorar las condiciones de vida de pequeñas localidades ubicadas en zonas costeras donde llevarles agua por otros medios sería muy costoso.

Este trabajo pretende aportar conocimiento al entendimiento de esta tecnología. El propósito es determinar la orientación en la cual el funcionamiento del destilador es más eficiente.

En el capítulo 1 se documentan los avances que se han obtenido a lo largo del tiempo sobre destilación solar, se pone especial atención a los trabajos desarrollados en este campo en México, también se mencionan algunos de los principales trabajos enfocados a entender el proceso de la destilación solar.

El capítulo 2 menciona los principios teóricos que fundamentan este trabajo, se describe brevemente aspectos físicos de la radiación solar, algunas definiciones básicas y las técnicas teórico y prácticas que existen para medir la radiación solar, finalmente se describen los conceptos básicos de transferencia de calor que se ven involucrados en el proceso de la destilación solar.

En el capítulo 3 se hace referencia a los diferentes tipos de destiladores solares, características y modos de operación de cada uno de ellos, se pone mayor énfasis en los mecanismos de transferencia de calor y masa que se ven involucrados en un destilador solar.

Los objetivos, planteamiento del problema, hipótesis y metodología, se encuentran en el capítulo 4, al final de éste se muestran los resultados obtenidos para cuatro orientaciones diferentes, donde se puede observar las variaciones en la producción, principalmente en los condensadores, se muestra también los gráficos del clima, como son radiación solar, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento.

La discusión de los resultados se hace en el capítulo 5, se calculan las eficiencias del evaporador y los condensadores en cada una de las orientaciones para determinar cual es la mejor orientación.

El capítulo 6 trata sobre las conclusiones relevantes de este trabajo con base en los objetivos planteados y se hacen recomendaciones para futuras investigaciones sobre el tema.

Finalmente en el anexo I se presenta un programa de computo para ver los efectos en la producción, cuando el destilador es recargado a diferentes horas del día; en el anexo II, se definen algunos de los términos más utilizados en este trabajo.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

La destilación solar es una práctica que se conoce desde tiempos muy remotos. El primer trabajo publicado sobre destilación solar es de alquimistas árabes en 1551 (**Mouchot 1869**). **Nebbia y Menozzi (1966)** en su revisión histórica sobre desalinización de agua mencionan el trabajo de Della Porta el cual fue publicado en 1589. **Malik et al. (1982)** describen el trabajo del químico francés Lavoisier quien usó concentradores solares para calentar alambiques en 1862. En este mismo trabajo describen el desarrollo en lo que concierne a la fabricación y operación de destiladores solares convencionales partiendo del año de 1872 cuando, según los autores, se construyó el primer destilador solar en Chile para abastecer de agua fresca a una comunidad minera. Continúan con su descripción de los avances realizados durante la Primera y Segunda Guerra Mundial periodo durante el cual se tuvo gran avance en el diseño y construcción de estos equipos.

Finalmente describen los trabajos sobre destiladores tipo caseta (también llamado tipo invernadero) y hacen referencia a los esfuerzos de otros investigadores en este campo de la destilación solar.

En México los trabajos sobre destilación solar empezaron por 1972. La mayor parte de los esfuerzos sobre este tema se ha efectuado en el noroeste del país, principalmente en la península de Baja California, esto debido a las condiciones climáticas favorables, cielo despejado la mayor parte del año y abundante agua de mar tanto del Golfo de California como del Océano Pacífico.

Entre el año de 1972 y 1976, un número considerable de pequeños destiladores de caseta fueron construidos para utilizarse en lugares remotos, con resultados buenos, sin embargo, sólo operaron algunos años por la falta de comprensión local de esta tecnología.

En 1978, gracias al Convenio Básico de Cooperación Científica y Tecnológica entre México y la entonces República Federal Alemana (RFA), la Dirección General de Aprovechamiento de Aguas Salinas y Energía Solar (DIGAASES) y el Ministerio de Investigación Tecnológica de la RFA, llevaron a cabo un programa de cooperación binacional en el campo de la energía solar, al cual denominaron "Sontlan", Este proyecto se llevó a cabo en Las Barrancas una pequeña comunidad de pescadores en el municipio de Comondú en Baja California Sur. Sin embargo, lo que pudo haber sido una fuente de conocimiento científico tanto para Alemania como para México se convirtió en "un convenio entre la tecnología alemana y el Sol mexicano" (Rincon, 1999).

A mediados de los ochentas se reforzaron los esfuerzos para comprender los principios básicos de la destilación solar. En el Instituto Tecnológico de La Paz se construyó un destilador solar indirecto con 11 etapas de destilación directa y recuperación de calor calentado por colectores de placas planas de doble vidrio, a pesar de que se tuvieron grandes avances con este proyecto no siguió desarrollándose por falta de recursos.

En puerto Chale, aproximadamente a 250 Km al norte de La Paz BCS, en la costa del Pacífico, se probó un destilador solar de caseta. El destilador consta de seis bandejas de 1.6 m de ancho y 40 m de largo, cada una de las bandejas se comporta como un destilador solar largo. La producción se estimó en 1.6 m³, suficiente para el consumo humano de esta población.

En el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), se ha estado efectuando trabajo experimental en este campo, como es el caso del análisis experimental que se hizo de un destilador de gran sección transversal, mantenido bajo condiciones controladas. También se efectuó experimentación con seis destiladores solares idénticos excepto por la distancia entre la salmuera y el vidrio, bajo condiciones reales de operación en el medio ambiente, los resultados de este trabajo se encuentran en la tesis doctoral de **Porta Gándara (1997)**. Actualmente se trabaja con un destilador solar tipo caseta de doble pendiente.

Quizá el trabajo de mayor trascendencia de las últimas décadas es el de **Dunkle (1961)**, ya que es el primer reporte en el que se establecen las bases de un análisis completo de las ecuaciones de balance en los distintos elementos de un destilador solar mediante parámetros concentrados, tanto para un destilador convencional de caseta como para el que llama de difusión de efecto múltiple.

Cooper (1969), en un trabajo puramente teórico analiza el efecto de diferentes parámetros en la producción, de los que destacan la cantidad inicial de salmuera con y sin aislante térmico bajo la charola, de esto concluye que sin aislante no se tiene un efecto significativo, pero para tirantes de 0.5 a 12 pulgadas el efecto de adicionar aislante térmico permite incrementar un 30% el destilado. Otra variable importante es la velocidad del viento, observa que después de 5 millas/h el incremento en la producción es muy pequeño.

Singh (1994) en un estudio numérico sobre la optimización de la orientación de destiladores solares de alta producción, encuentra, para la localización de Nueva Delhi, que la orientación Este-Oeste de un destilador solar de doble pendiente y ángulo de inclinación de los condensadores de 55° presenta la máxima producción.

Capítulo 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se describe brevemente los conceptos teóricos que sustentan el trabajo experimental desarrollado. Primeramente se mencionan algunos conceptos sobre radiación solar y las técnicas que existen tanto teóricas como de campo para la estimación y medición de ésta. Finalmente se hace referencia a los mecanismos de transferencia de calor que están involucrados en el proceso de la destilación solar.

2.1. Principios físicos de la radiación solar

2.1.1. El Sol

El Sol es la estrella más cercana a la tierra, en promedio se encuentra a 1.5×10^{11} m y presenta la forma de un disco brillante de diámetro angular igual a 32 minutos de arco; se estima que el radio del Sol es de 1.39×10^9 m. La Ley de la Gravitación Universal y las leyes de movimiento de los planetas permiten calcular su masa en 1.99×10^{30} Kg.

El Sol tiene una temperatura de cuerpo negro efectiva de 5777 K. En el interior se aprecia que la temperatura varía entre 8×10^6 y 40×10^6 K y la densidad se calcula en 100 veces superior a la del agua. 90% de la energía del Sol es generada en la región de 0 a 0.23R (donde R es el radio), la cual contiene 40% de la masa total de éste. A una distancia de 0.7R del centro, la temperatura ha caído a 130,000 K y la densidad ha disminuido a 70 kg/m^3 ; aquí los procesos de convección se vuelven relevantes y la zona de 0.7R a 1.0R es conocida como

zona convectiva. La temperatura en esta región baja a 5000 K y la densidad es del orden de 10^{-5} kg/m³ (Duffie, 1991).

Por lo que respecta a su composición química, el análisis espectral de la radiación emitida por el Sol indica que en él están presentes casi todos los elementos de la tabla periódica, pero el hidrógeno y el helio representan por número de átomos el 90.7 y 9.1% respectivamente. Después de ellos el oxígeno, el carbono y el nitrógeno son los más abundantes.

Se puede considerar al Sol como un reactor de fusión continua. Una de las reacciones más importante que proporciona la energía radiada por el sol, es la que se lleva acabo cuando el hidrógeno (cuatro protones) se combina para formar un núcleo de helio, la masa de este núcleo de helio es menor que la de los cuatro protones, por lo que la masa que se pierde se convierte en energía.

2.1.2. Flujo primario

2.1.2.1 Generación

La densidad de flujo de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre de acuerdo a la distancia media entre la Tierra y el Sol (d_0) es aproximadamente igual a 1367 W/m² que es la constante solar G_0^*

$$F = 4\pi d_0^2 G_0^* \quad (2.1)$$

A partir de esta ecuación se obtiene que el Sol emite 3.85×10^{26} J/s. Ahora ya que en un ciclo protónico se producen 3.82×10^{12} J, se puede calcular

fácilmente que cada segundo se llevan a cabo 10^{38} ciclos protónicos y se transforman en energía 4250 millones de toneladas de hidrógeno.

Tomando en cuenta que aproximadamente el 72% de la masa solar es hidrógeno lo que corresponde a 1.43×10^{30} kg, para que se consuma la décima parte de esta masa, deben emplearse 10^{12} años (IIMUACPP, 1996).

2.1.2.2 Distribución

La tierra describe una órbita elíptica al rededor del Sol cuya configuración se determina por tres parámetros: la excentricidad (e), la oblicuidad (ϕ), la posición angular del perihelio (ω) con respecto al equinoccio de primavera.

El Sol alumbra perpendicularmente sobre diferentes paralelos debido a la inclinación del plano ecuatorial con respecto al plano de la eclíptica. Así el Sol alumbra perpendicularmente sobre el paralelo de los 23.5° N conocido como Trópico de Cáncer alrededor del 21 de Junio, mientras que el 21 de diciembre lo hace sobre el paralelo 23.5° S ó Trópico de Capricornio y sobre el Ecuador en dos ocasiones al año: el 21 de marzo y el 21 de septiembre.

2.1.3. Flujo secundario

El flujo de radiación secundario es el que se forma por el efecto de dispersión. Este fenómeno está directamente relacionado con el concepto de heterogeneidad óptica.

Cuando la luz se propaga en un medio cuyas propiedades ópticas son constantes, la dirección de propagación no varía y por lo tanto la dispersión no se observa; sin embargo, si en la trayectoria de las ondas electromagnéticas se encuentran objetos, (centros de dispersión) en los cuales el índice de refracción es diferente al del medio de propagación, dichos objetos o centros de dispersión son excitados por la acción de la luz incidente, y se convierten en emisores de luz secundarias. Pero para que este fenómeno sea observable, los centros de distribución deben tener una distribución espacial aleatoria.

La atmósfera para el estudio de la dispersión de la luz puede considerarse como un aerosol, que en este caso debe ampliarse un poco más para incluir las partículas líquidas y mixtas que forman parte también del sistema de partículas atmosféricas. Debido al movimiento caótico de las partículas en el aire, éstas constituyen centros efectivos de dispersión de la radiación solar.

El flujo primario de radiación solar que llega a la atmósfera empieza a sufrir modificaciones debido a la absorción y dispersión en gases y partículas.

El ozono elimina casi toda la radiación ultravioleta del flujo primario, la cual en grandes cantidades es dañina para los organismos que habitan la tierra. En la estratosfera existe también la atenuación debido al sistema de partículas en esta región, que se originan de los restos de meteoritos que penetran la atmósfera y de las erupciones volcánicas. En las capas inferiores (estratosfera interior y troposfera) se lleva a cabo la modulación del flujo de radiación solar causado por el vapor de agua, bióxido de carbono y las partículas suspendidas (IIMUACPP, 1996).

2.2. Estimaciones teóricas de la radiación solar

El cálculo del flujo de radiación global bajo las condiciones reales de la atmósfera es complicado aún cuando se considere a ésta como una capa plana y estratificada, ya que se requiere resolver una ecuación integrodiferencial conocida como "ecuación de transferencia radiativa". La dificultad para encontrar una solución exacta crece cuando se desea considerar la dispersión y/o absorción molecular. Esto se complica aún más si a todo esto se le agregan los efectos de reflexión múltiple que ocurren principalmente cerca de la superficie terrestre. **Hottel (1976)**, estima la radiación solar directa a través de una atmósfera clara y toma en cuenta el ángulo cenit y la altitud. La transmitancia atmosférica para la radiación directa τ_b es G_{bn}/G_{on} y está dada en la forma

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp(-k/\cos\theta_z) \quad (2.2)$$

Las constantes a_0 , a_1 y k se obtienen de a_0^* , a_1^* y k^* , las cuales están dadas para altitudes menores de 2.5 Km. por

$$a_0^* = 0.4237 - 0.008216(6 - A)^2 \quad (2.3)$$

$$a_1^* = 0.5055 - 0.00595(6.5 - A)^2 \quad (2.4)$$

$$k^* = 0.2711 - 0.01858(2.5 - A)^2 \quad (2.5)$$

donde A es la altitud del observador en kilómetros.

Los factores de corrección $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$ y $r_k = k/k^*$, están dados en la tabla 2.1 para cuatro tipos de clima.

Tabla 2.1 Factores de corrección para cuatro tipos de clima.

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Verano latitud media	0.97	0.99	1.02
Verano subártico	0.99	0.99	1.01
Invierno latitud media	1.03	1.01	1.00

La radiación normal directa para un cielo claro es entonces

$$G_{cnb} = G_{on} \tau_b \quad (2.6)$$

donde G_{on} se obtiene con la siguiente expresión (Duffie 1991)

$$G_{on} = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.7)$$

La radiación directa para un plano horizontal es

$$G_{cb} = G_{on} \tau_b \cos \theta_z \quad (2.8)$$

Para obtener la radiación solar total es necesario calcular la radiación difusa. **Luis y Jordan (1960)**, desarrollaron una relación empírica entre el coeficiente de la radiación directa y difuso para días claros

$$\tau_b = \frac{G_d}{G_0} = 0.271 - 0.294\tau_b \quad (2.9)$$

2.3. Técnicas de medición de la radiación solar

La radiación que llega a la superficie terrestre esta compuesta por la radiación directa y la radiación difusa y la suma de ambas constituye la llamada radiación global. Los instrumentos para medir la radiación solar son básicamente de dos tipos: el Pirheliómetro que mide la radiación directa y el Piranómetro que mide la radiación global.

2.3.1. Pirheliómetro

El Pirheliómetro es un instrumento que usa un detector colimado para medir la radiación solar directa y de una pequeña porción del cielo al rededor del sol que incide normalmente. Por las limitaciones prácticas en los mecanismos de seguimiento, el Pirheliómetro puede recibir energía de un cono de 5° a 7° de apertura, la cual es mayor que la del disco solar que corresponde aproximadamente a 0.5°.

2.3.2. Piranómetro

El piranómetro es un instrumento empleado para medir la radiación total, es decir, directa más difusa. El detector de este instrumento debe tener una

respuesta independiente de la longitud de onda sobre el espectro de energía solar. Además, debe tener una respuesta independiente del ángulo de incidencia de la radiación solar. Los detectores de los piranómetros deben estar cubiertos con uno o dos vidrios hemisféricos para protegerlos del viento y otros efectos extraños, esta cubierta debe ser muy uniforme en su espesor para que no cause ningún efecto en la distribución de la radiación en el detector.

2.3.3. Variación de la energía solar.

La variación de la radiación solar a lo largo del año en el sitio de experimentación, el cual se localiza en la ciudad de La Paz, 24.15° latitud Norte, 110° longitud Oeste, se muestra en el siguiente gráfico (Fernández, 1997).

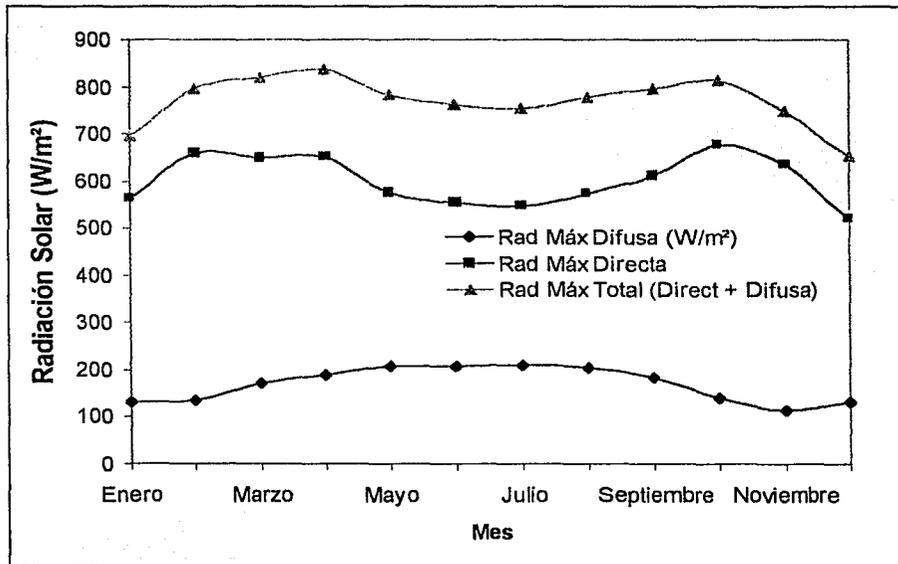


Figura 2.1 Variación de la radiación solar en el año para el sitio de experimentación (La Paz B.C.S., México)

2.4. Conceptos básicos de transferencia de calor

2.4.1 Radiación

La transferencia de calor por radiación se define como la transferencia de energía a través de las fronteras de un sistema por medio de un mecanismo electromagnético el cual es causado solamente por una diferencia de temperaturas (**Thomas 1992**). Como sabemos la temperatura es un índice del nivel de agitación de las partículas microscópicas. Ya que las moléculas y sus componentes están en movimiento continuo, la radiación térmica siempre es emitida por materia física.

Los medios a través de los cuales la radiación térmica fluye, pueden ser un vacío, un gas, un líquido o un sólido. Los objetos que se encuentran en la ruta de la radiación absorben, reflejan y, si son transparentes transmiten la radiación térmica incidente. La radiación electromagnética que es absorbida por la materia se convierte en energía interna, la cual puede ser almacenada, transferida por convección y convertida de nuevo a radiación electromagnética que es dada por la materia misma. La absorptancia α , reflectancia ρ y transmitancia τ , representan la fracción de la radiación térmica incidente que es absorbida, reflejada y transmitida respectivamente. Entonces se tiene que

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.10)$$

Estas propiedades dependen principalmente de la temperatura de la fuente emisora y de la naturaleza de la superficie que recibe la radiación térmica.

La irradiación es el flujo de radiación térmica por metro cuadrado sobre una superficie, y se contabiliza por las fracciones de radiación incidente en toda la

longitud de onda que se absorben, reflejan y transmiten. Entonces la radiación que recibe una superficie se distribuye de la siguiente manera

Flujo de radiación térmica absorbida por metro cuadrado	αG
Flujo de radiación térmica reflejada por metro cuadrado	ρG
<u>Flujo de radiación térmica transmitida por metro cuadrado</u>	<u>τG</u>
Radiación total	G

2.4.1.1 Espectro electromagnético

Todos los tipos de ondas electromagnéticas se caracterizan por tener una frecuencia ν y una velocidad de propagación en el espacio libre igual a la velocidad de la luz c . La longitud de onda λ se define en términos de ν y c por

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.11)$$

La velocidad de propagación y la longitud de onda de una radiación directa dependen del medio, la frecuencia depende solamente de la fuente radiante y es independiente de la sustancia a través de la cual se transmite. Los diferentes tipos de radiación electromagnética se caracterizan de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia por el espectro electromagnético, figura 2.2. (Duffie 1991)

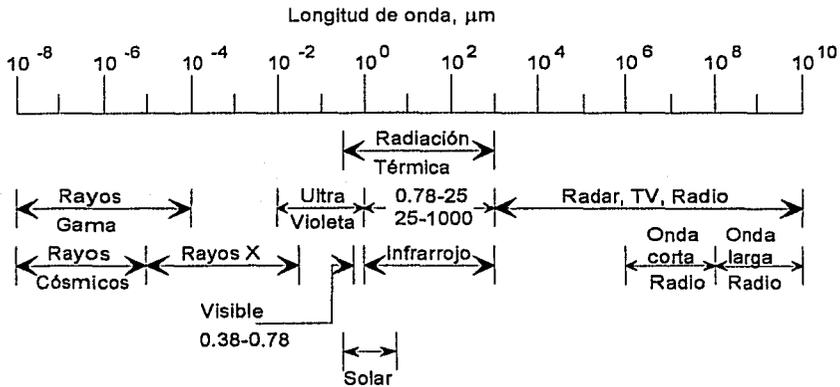


Figura 2.2 Espectro electromagnético

2.4.1.2 Propiedades de la radiación térmica

El intercambio de radiación térmica entre superficies es una función de las propiedades de la superficie de emisión; propiedades de absorción, reflexión y transmisión y las propiedades del medio que cae dentro del camino de la radiación térmica.

Un cuerpo emite energía radiante continuamente en una cantidad que está relacionada con su temperatura y la naturaleza de su superficie. Un objeto que absorbe toda la energía radiante que llega a su superficie ($\alpha = 1$) se le llama cuerpo negro (**Ozidik, 1985**). Éste es un absorbedor ideal y emite energía radiante a una razón que es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de la superficie. La ley de Stefan-Boltzmann para la radiación térmica de un cuerpo negro tiene la forma

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (2.12)$$

donde la potencia emisiva total E_b para un cuerpo negro es la radiación térmica total emitida por un radiador perfecto por unidad de superficie, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), y T_s es la temperatura absoluta de la superficie.

Para superficies reales que absorben menos del 100% de la energía radiante incidente, la potencia emisiva total E se expresa generalmente por

$$E = \epsilon E_b = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (2.13)$$

donde la emisividad ϵ esta entre cero y uno. La distribución de longitud de onda de radiación emitida por un cuerpo negro está dada por la ley de Planck

$$E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left\{ \exp \left[\frac{C_2}{(\lambda T_s)} \right] - 1 \right\}} \quad (2.14)$$

donde $C_1 = 3.743 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4/\text{m}^2$ y $C_2 = 1.439 \times 10^4 \mu\text{mK}$.

2.4.1.3 Coeficiente de transferencia de calor por radiación

Por definición la razón de transferencia de calor por radiación q_R entre dos cuerpos es igual al intercambio neto de radiación térmica (**Thomas 1992**), y se describe por la ecuación 2.15

$$q_R = h_r(T_2 - T_1) \quad (2.15)$$

La radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta T_1 hacia una envoltura a temperatura T_2 que lo rodea completamente y la cual se comporta como cuerpo negro, puede evaluarse mediante la expresión.

$$Q = \sigma A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.16)$$

Por otra parte, la radiación emitida por un cuerpo gris a una temperatura absoluta T_1 hacia la misma envoltura a temperatura T_2 , puede calcularse ahora mediante la expresión.

$$Q = \sigma \epsilon A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.17)$$

El coeficiente de transferencia de calor entre las dos superficies está dado por

$$h_R = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1 - \epsilon_2)A_1}{\epsilon_2 A_2}} \quad (2.18)$$

Si las áreas A_1 y A_2 no son iguales, el valor numérico de h_R depende si es usado con A_1 o con A_2 .

Cuando T_1 y T_2 están muy cerca, el numerador de la ecuación 2.18 puede ser expresado como $4\sigma\bar{T}^3$ donde \bar{T} es la temperatura promedio

$$4\sigma\bar{T}^3 = \sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1) \quad (2.19)$$

2.4.2 Convección

Cuando existe intercambio de calor entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, la transferencia de calor se lleva a cabo principalmente por convección.

La convección va siempre acompañada de la conducción siendo este último mecanismo importante en el sentido perpendicular a la dirección de la corriente del fluido.

Dependiendo de las características del flujo la convección puede ser de dos tipos: convección forzada y convección libre o natural. La convección forzada se presenta cuando el movimiento del fluido es artificialmente inducido ya sea por una bomba o ventilador. La convección libre por el contrario tiene lugar cuando el fluido se mueve como consecuencia de los cambios de densidad que experimenta en las proximidades de las regiones calientes y frías del sistema. Estas diferencias de densidades dan lugar a fuerzas internas llamadas de flotación o de empuje.

Para determinar la transferencia de calor por convección se necesita también la distribución de velocidades en el fluido, ya que la velocidad está incluida dentro de la ecuación de energía; la solución de la ecuación de energía produce la distribución de temperaturas en el fluido. Se define el coeficiente de transferencia de calor local h para calcular la densidad de flujo de calor entre el fluido y la pared:

$$q = h\Delta T \quad (2.20)$$

El coeficiente de transferencia de calor varía con el tipo de flujo, la geometría del cuerpo, el área por la cual pasa el flujo, las propiedades físicas del fluido, la temperatura promedio y la posición a lo largo de la superficie del cuerpo. Depende también si la transferencia de calor es por convección forzada o natural (Incropera, 1996).

Ya que las condiciones de flujo varían de punto a punto en la superficie, tanto q como h varían también a lo largo de la superficie. El flujo total de transferencia de calor Q puede ser obtenido integrando q sobre la superficie entera. Esto es,

$$Q = \int_{A_s} q dA_s \quad (2.21)$$

de la ecuación 2.20 obtenemos,

$$Q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA_s \quad (2.22)$$

Si definimos un coeficiente de convección promedio a lo largo de toda la superficie, la transferencia de calor total puede ser expresada como,

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (2.23)$$

de las dos ecuaciones anteriores, es claro que el coeficiente de convección promedio y el local, están relacionados por una expresión de la forma,

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s \quad (2.24)$$

La transferencia de calor por convección esta gobernada por las ecuaciones que describen las condiciones de la capa límite. Estas ecuaciones son las que describen el desarrollo de la capa limite de velocidades y térmica.

Para la capa limite de velocidades

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (2.25)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + X \quad (2.26)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + Y \quad (2.27)$$

donde

ρ = la densidad total

u = la velocidad másica promedio de la componente en x

v = la velocidad másica promedio de la componente en y

p = presión

μ = viscosidad del fluido

X = fuerzas de cuerpo total actuando en la dirección x

Y = fuerzas de cuerpo total actuando en la dirección y

Las ecuaciones 2.25, 2.26 y 2.27 dan una representación completa de las condiciones de la capa límite de velocidades bidimensional, y el campo de velocidades en la capa límite se puede determinar resolviendo estas ecuaciones.

La capa límite térmica en términos de la temperatura es descrita por la ecuación 2.28

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \mu \Phi + \dot{q} \quad (2.28)$$

El término $\mu \Phi$ es la disipación viscosa y representa la razón a la cual la energía cinética es irreversiblemente convertida a energía térmica debido a los efectos viscosos en el fluido; \dot{q} es el término de generación de energía por unidad de volumen.

2.4.3 Convección libre

En la convección libre el movimiento del fluido se debe a las fuerzas de flotación en el fluido. La flotación se ocasiona por la presencia combinada de un gradiente de densidades y una fuerza de cuerpo que es proporcional a la densidad. En los casos más comunes el gradiente de densidad es ocasionado por un gradiente de temperatura, y la fuerza de cuerpo a un campo gravitacional.

El grupo de ecuaciones que gobiernan la convección libre es (Incropera, 1985):

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.29)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (2.30)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.31)$$

Los efectos de la convección libre dependen de β que es el coeficiente de expansión térmica, y proporciona una medida de la cantidad por la cual la densidad cambia en respuesta a un cambio en la temperatura a presión constante.

$$\beta \approx \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.32)$$

2.4.3.1 Números adimensionales

Los números adimensionales pueden obtenerse adimensionalizando las ecuaciones que gobiernan la convección natural. Para ello introducimos

$$x^* \equiv \frac{x}{L}$$

$$y^* \equiv \frac{y}{L}$$

$$u^* \equiv \frac{u}{u_0}$$

$$v^* \equiv \frac{v}{u_0}$$

$$T^* \equiv \frac{T - T_{\infty}}{T_s - T_{\infty}}$$

donde L es la longitud característica y u_0 es una velocidad de referencia arbitraria. Entonces las ecuaciones 2.30 y 2.31 se reducen a (**Ozidik, 1985**)

$$u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} = \frac{g\beta(T - T_\infty)L}{u_0^2} T^* + \frac{1}{Re_L} \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} \quad (2.33)$$

$$u^* \frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re_L Pr} \frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}} \quad (2.34)$$

El primer término de la derecha de la ecuación 2.33 es consecuencia directa de las fuerzas de flotación, sin embargo, ya que está expresado en términos de una velocidad de referencia desconocida, necesita expresarse de otra forma. Esto se hace multiplicando la expresión por $Re_L^2 = (u_0 L / \nu)^2$. El resultado es el número de Grashof Gr_L .

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L}{u_0^2} \left(\frac{u_0 L}{\nu} \right)^2 = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (2.35)$$

El número de Grashof indica la razón de las fuerzas de flotación a las fuerzas viscosas que actúan en el fluido. El número de Nusselt $Nu = f(Re, Gr, Pr)$, es importante cuando los efectos de la convección forzada y libre son comparables. Cuando $(Gr/Re^2) \approx 1$, los efectos combinados entre la convección libre y forzada son comparables. Si $(Gr/Re^2) \ll 1$, entonces los efectos por convección libre pueden ser despreciados y el $Nu = f(Re, Pr)$. Por el contrario, si $(Gr/Re^2) \gg 1$, se desprecian los efectos de la convección forzada y el $Nu = f(Gr, Pr)$.

El Nusselt se obtiene mediante la expresión:

$$\text{Nu} = \frac{hL}{k} \quad (2.36)$$

y representa una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie. El Prandtl se define como la razón de la difusividad de momento ν a la difusividad térmica α . El número de Prandtl da una medida de la efectividad relativa de transporte de momento y energía por difusión en la capa límite de velocidad y térmica respectivamente.

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.37)$$

Cuando existe transferencia simultánea de calor y masa simultáneamente, y el número de Lewis es igual a uno, quiere decir que la transferencia de calor es análoga a la de masa, y por tanto, se pueden establecer las correlaciones de transferencia de masa cambiando el número de Nusselt por el de Sherwood, y el número de Prandtl por el de Schmidt (**Malik et al 1982**).

$$\text{Le} = \frac{\alpha}{D_{AB}} \quad (2.38)$$

$$\text{Sh} = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (2.39)$$

$$\text{Sc} = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (2.40)$$

El número de Lewis, Le , es una medida del espesor relativo de la capa límite térmica y de concentraciones, y es relevante en cualquier situación donde se tiene transferencia de calor y masa por convección simultáneamente. El número de Sherwood, Sh , proporciona una medida de la transferencia de masa que ocurre en la superficie. Finalmente el número de Schmidt, es una medida de la

efectividad relativa del transporte de momento y de masa por difusión en la capa límite de velocidad y de concentración.

2.4.4 Coeficiente de convección debido al viento

McAdams (1954) reportó la siguiente ecuación para el coeficiente de convección

$$h = 5.7 + 3.8V \quad (2.41)$$

donde V es la velocidad de viento en m/s y h esta en W/m^2C . Ya que es probable que los efectos de convección libre y radiación se encuentren incluidos en esta ecuación (Duffie y Beckman 1991), por esta razón Watmuff et al (1977) reporto que esta ecuación debe ser

$$h = 2.8 + 3.0V \quad (2.42)$$

2.4.5 Transferencia simultanea de calor y masa

Los gradientes de densidad pueden existir en un fluido como consecuencia de la variación espacial en la composición de éste. Tales variaciones existen cuando la transferencia de las especies se lleva a cabo debido a un gradiente de concentraciones. Por lo tanto, bajo la influencia de un campo gravitacional, los flujos de convección libre pueden ser inducidos en los procesos de transferencia de las especies.

Una aplicación importante de la transferencia de calor y masa es el proceso de evaporación, el cual ocurre donde quiera que un gas fluya sobre un líquido. La evaporación debe ocurrir desde la superficie líquida, y la energía asociada con el

cambio de fase es el calor latente de evaporación del líquido. La evaporación ocurre cuando la temperatura del agua excede la temperatura del aire que se encuentra por encima de ésta. La energía requerida para mantener la evaporación debe venir de la energía interna del líquido, el cual entonces debe experimentar una reducción de la temperatura. Sin embargo, si el régimen permanente no se alcanza, la pérdida de energía latente causada por la evaporación se debe reponer por la transferencia de energía al líquido desde sus alrededores. Esta transferencia de energía puede ser ocasionada por la convección de energía sensible del gas o por el calentamiento desde otra fuente. Aplicando el principio de conservación de energía a una superficie de control sobre el líquido, tenemos que para una unidad de superficie (Incropera, 1996)

$$q_{\text{conv}} + q_{\text{adic}} = q_{\text{evap}} \quad (2.43)$$

donde q_{evap} se puede aproximar como el producto del flujo de masa evaporada por metro cuadrado y el calor latente de evaporación

$$q_{\text{evap}} = M_e h_{fg} \quad (2.44)$$

Si no hay transferencia de calor por otra fuente, la ecuación 2.43 se reduce a un balance entre la transferencia de calor por convección del gas y las pérdidas de calor por evaporación del líquido. La ecuación 2.43 puede ser expresada como

$$h(T_{\infty} - T_s) = h_{fg} h_m [\rho_{A,\text{sat}}(T_s) - \rho_{A,\infty}] \quad (2.45)$$

donde la densidad de vapor en la superficie esta asociada con las condiciones de saturación a T_s .

Capítulo 3

DESTILACIÓN SOLAR

3.1 Destiladores solares

Un destilador solar convencional es un recipiente cerrado, usualmente fabricado de hierro galvanizado en una forma rectangular. Tiene una cubierta transparente que permite el paso de la radiación solar, por ejemplo vidrio, y la superficie interior de su base está ennegrecida para absorber la máxima cantidad de energía solar posible.

Existe una gran variedad de tipos de destiladores en cuanto a diseño, como los descritos por **Malik et al (1982)**, estos diseños difieren en su estructura y en los materiales de construcción, pero básicamente, incorporan elementos comunes para diferentes funciones.

Los destiladores solares someros se caracterizan por tener un único recipiente el cual contiene la salmuera, sin embargo, pueden tener más de una cubierta. La cubierta que puede ser de vidrio o plástico es transparente a la radiación solar que llega al destilador. Además de esto, la cubierta no permite la salida del aire húmedo atrapado dentro del destilador y provee una superficie fría para la condensación del vapor de agua. La cubierta deberá estar inclinada hacia un lado con un ángulo adecuado para facilitar el fácil flujo de las gotas de agua condensadas en ella, hacia el colector de destilado. El colector deberá estar también inclinado para que el agua colectada salga del destilador hacia recipientes colectores de destilado. Es importante que el ángulo de inclinación del condensador no sea tan grande que no permita el libre paso de los rayos del sol al medio día solar, cuando la radiación solar es máxima.

El recipiente del destilador deberá estar herméticamente sellado para no permitir las fugas de agua, y el destilador en general hermético a las fugas del aire, la base del destilador deberá ser ennegrecida para permitir la máxima absorción de la energía solar. Figura 3.1.

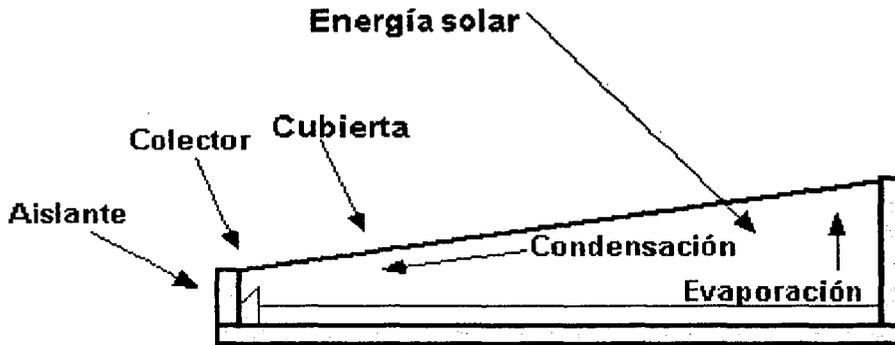


Figura 3.1 Destilador Solar Somero

Otro tipo de destilador solar es el de tipo canal, el cual es prácticamente igual al descrito arriba, pero se desarrollan longitudinalmente hasta alcanzar largos de 40 m. La charola de la base se construye de ferrocemento delgado, y los vidrios se unen entre sí mediante sellador. El agua de mar se puede tomar mediante una aerobomba.

Estos aparatos tienen un flujo de agua de mar longitudinal y constante. Para el ancho de 1.60 m de cada canal, el flujo longitudinal de agua de mar es del orden de 700 a 1000 litros diarios, con los cuales un canal de 40 m de largo produciría aproximadamente 320 litros diarios.

El destilador solar de múltiple efecto es un destilador típico de alto rendimiento, este tipo de destilador produce una mayor cantidad de agua destilada para una insolación dada que la de un destilador solar de una sola etapa con la misma área. Esto es posible al utilizar el calor latente de evaporación que se libera por la condensación del vapor de agua, para calentar la salmuera que se encuentra a una temperatura inferior. Así, un destilador solar de este tipo tiene un sistema multietapas, donde las etapas sucesivas producen una menor cantidad de agua destilada. Los destiladores solares de múltiples etapas presentan diseños sofisticados, son mas caros y operan eficientemente sólo a temperaturas relativamente altas. Esto se compensa con una producción mucho mayor de agua destilada. La última consideración en un destilador solar de múltiple efecto dependerá de sus largos períodos de funcionamiento y producción durante períodos de alta y baja insolación, la producción de agua destilada durante los períodos de alta insolación deberá compensar la baja producción durante la baja insolación.

Un destilador solar de múltiple efecto opera esencialmente igual que un destilador convencional, La energía transmitida es almacenada en el absorbedor, el agua en contacto con el absorbedor se calienta y por consecuencia parte de ella se evapora. La cubierta se encuentra más fría que el absorbedor y la salmuera, y por lo tanto, el vapor condensa en ésta. El calor latente que se libera por la condensación del vapor de agua, se disipa por un complejo mecanismo de transferencia de calor que involucra conducción, convección y la radiación.

Existen diferentes diseños para estos tipos de destiladores algunos de ellos son, el destilador de difusión, de chimenea, de triple efecto y de doble recipiente.

El destilador solar de difusión fue propuesto por **Oltra (1972)**. Este sistema está conformado por dos unidades separadas. Una de ellas es un tanque de

almacenamiento de agua caliente, acoplado a un colector solar, y la otra es la unidad de destilación. El destilador consiste en una serie de placas de metal colocadas verticalmente en el contenedor. La placa en el extremo izquierdo, llamada la primera placa, se calienta por el agua caliente que fluye del tanque de almacenamiento a través de tubos unidos en la superficie del lado izquierdo de la placa. Por otro lado, la placa del extremo derecho (última placa) se enfría por la salmuera que se alimenta a través de los tubos colocados en esta placa en su superficie del lado derecho. El agua caliente entra a la primera placa por la parte superior y fluye de regreso al tanque de almacenamiento por la parte inferior de la placa.

El agua caliente del tanque de almacenamiento calienta la primera placa causando la evaporación de la salmuera que fluye en el lado derecho de la placa. El vapor condensa en el lado izquierdo de la segunda placa, liberando su calor latente de evaporación en esta placa. El proceso continúa hasta la última placa, donde la condensación sólo causa el precalentamiento de la salmuera que entra al sistema. El agua condensada fluye de las placas hacia los canales colectores y sale del sistema. La salmuera concentrada se recolecta en el fondo del destilador y puede también ser removido del sistema (figura 3.2).

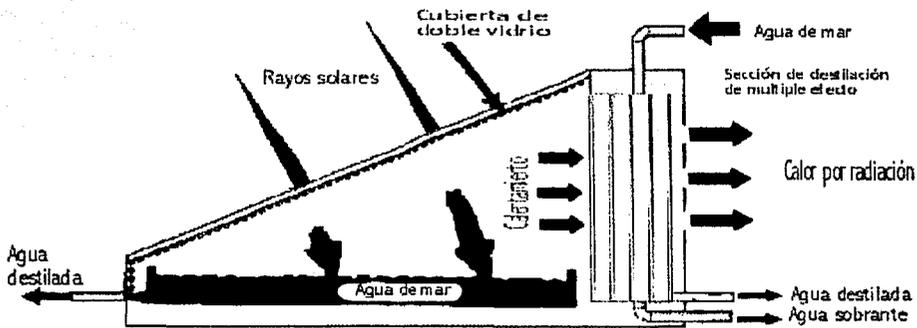


Figura 3.2 Destilador de múltiple efecto por difusión.

El destilador solar tipo chimenea fue desarrollado por **Bartali et al (1976)**. La forma de este destilador sería la de un destilador convencional con chimenea, en donde se encuentra un intercambiador de calor. La salmuera entra a la chimenea, fluye a través del intercambiador de calor y después pasa al destilador. El agua se evapora en el destilador debido a la radiación solar. El vapor se difunde por la chimenea y condensa en las aletas externas del intercambiador. El agua destilada se acumula en la base de la chimenea y sale del destilador. El calor latente liberado en el intercambiador de calor precalienta la salmuera alimentada. La salmuera concentrada puede ser removida de la base del destilador.

Cooper y Appleyard (1967) desarrollaron el destilador solar de triple efecto, el cual, consiste de un espacio cerrado con placas paralelas espaciadas, donde el espacio entre cada una de las placas constituye un efecto. La primera placa es el absorbedor y es calentada por la radiación solar y la última placa (condensador) se enfría debido al flujo de salmuera, lo que ocasiona que se forme un gradiente de temperatura. La salmuera fluye en cada una de las placas en el lado opuesto a la fuente de calentamiento. Una parte de la salmuera se evapora, y debido a la diferencia parcial de vapor, difunde a través del espacio hacia el condensador en la placa más fría de arriba. El calor latente de evaporación se conduce a través del condensador para promover la evaporación en el siguiente efecto. Así, el condensador de un efecto es esencialmente el evaporador del siguiente efecto, excepto para el primero y último elemento, los cuales son únicamente un evaporador y un condensador respectivamente.

Malik et al (1978), propuso un diseño simple para un destilador solar de doble recipiente. El calor latente de evaporación liberado en la superficie de la cubierta interior es utilizado para calentar una pequeña película de agua en la superficie

superior de la misma cubierta. Esto causa la evaporación del agua y el vapor condensa en la segunda cubierta (exterior).

Los destiladores solares inclinados representan un esfuerzo más que se ha ensayado para tratar de aumentar la eficiencia de los destiladores solares.

Un ejemplo de este tipo de destiladores es el destilador solar con charola inclinada, construido y estudiado por **Tleimat y Howe (1966)**. Se ha visto que la producción de un destilador inclinado es mucho mayor que la de un destilador convencional durante las horas de radiación solar, pero la producción nocturna de un destilador inclinado es casi cero. Esta diferencia en el funcionamiento se debe parcialmente a la diferencia en la profundidad del agua y en consecuencia en la capacidad calorífica en el caso de un destilador de charola inclinada y el destilador de recipiente profundo. El destilador de profundidad, con tirantes de agua de 0.3 m, tiene una capacidad calorífica muy grande y por lo tanto, la energía solar incrementa la temperatura del agua solamente hasta los 40 °C. La destilación a esta temperatura baja se efectúa muy lentamente, y correspondientemente se tiene un lento descenso de la temperatura debido a su gran capacidad calorífica, es por ello que la producción nocturna es significativa. En contraste un destilador con la charola inclinada, con un tirante de agua de menos de 1.27 cm, muestra una temperatura del agua por arriba de los 66 °C y por lo tanto tiene una alta producción durante las horas de insolación. Esta alta producción causa un rápido enfriamiento del agua en la charola, así que rápidamente después del ocaso, la temperatura del agua es muy baja para evaporar y por lo tanto la producción nocturna es muy pequeña (figura 3.3).

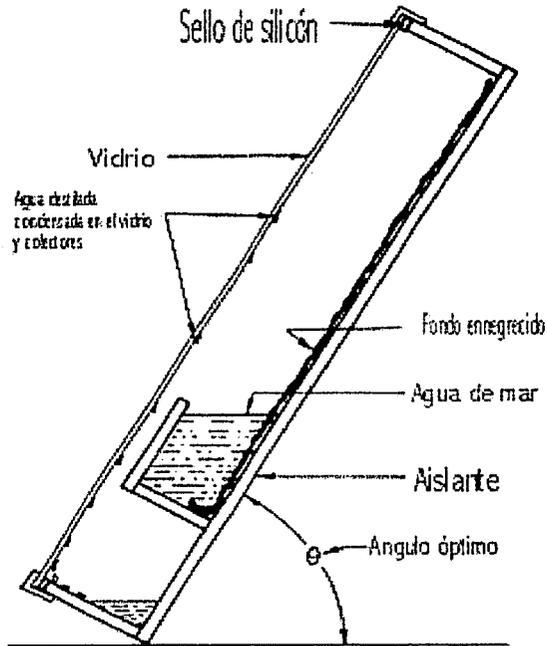


Figura 3.3 destilador solar inclinado

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

3.2 Principios de la destilación solar

La destilación solar inicia cuando el destilador se llena parcialmente con agua, ya sea corriente o salina, y se expone entonces al sol. La cubierta, que generalmente es de vidrio, permite a la radiación solar penetrar al destilador, esta radiación es absorbida principalmente por la base ennegrecida. En consecuencia, el agua se calienta y el contenido de humedad del aire atrapado entre la superficie del agua y la cubierta de vidrio se incrementa. La base también emite energía radiante en la región del infrarrojo la cual es reflejada dentro del destilador por la cubierta de vidrio; el vidrio no es transparente a esta longitud de onda. Así, la cubierta de vidrio atrapa la energía solar dentro del

destilador, esto reduce las pérdidas de calor convectivas. La cubierta usualmente se inclina hacia un lado para permitir al vapor de agua que condensa en la superficie de la cubierta escurrir hacia el colector.

El parámetro más importante que afecta la producción de un destilador solar, es la intensidad de radiación solar incidente en el destilador. Si E (Joules/m² día) es la cantidad de energía incidente en la cubierta del destilador y q_{evap} (Joules/m² día) es la energía utilizada en la evaporación, de la ecuación 2.40 es

$$M_e = q_{\text{evap}}/h_{fg} \quad (3.1)$$

La figura 3.1 ilustra los mecanismos principales de intercambio de energía en un destilador solar. Una gran parte de la radiación solar, directa y difusa, que cae sobre el destilador, se absorbe en la base ennegrecida. Pequeñas pérdidas por reflexión ocurren en la superficie de la cubierta, en la superficie del agua y una muy poca en la base. La energía absorbida en la base es en su mayoría transferida al agua en el destilador y una pequeña fracción de esta se pierde por conducción hacia el ambiente a través de la base. La energía es transferida del agua a la cubierta principalmente por el vapor de agua el cual cede su calor de evaporación a la cubierta durante la condensación. El calor es transferido a la cubierta desde el agua por convección libre del aire atrapado en el destilador. La cubierta absorbe una parte del calor irradiado por la superficie del agua, así como una pequeña porción de la energía solar incidente, el calor absorbido por la cubierta se transfiere a la atmósfera por convección y radiación. El intercambio de calor también ocurre en el cambio del contenido del calor sensible del agua que entra al destilador, el destilado que deja el destilador y la salmuera que se acumula.

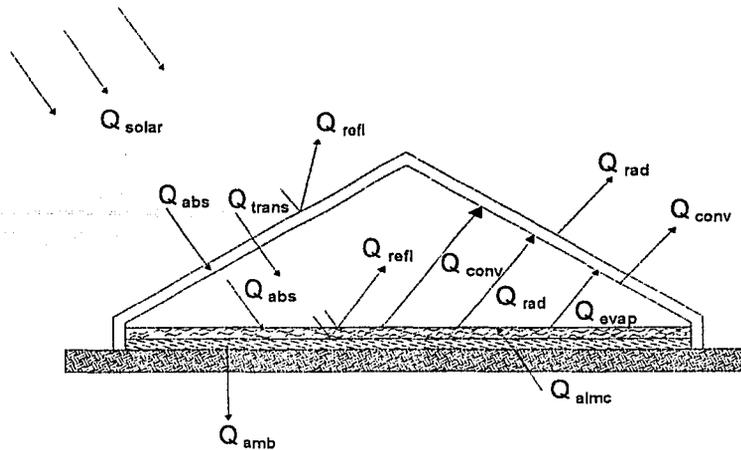


Figura 3.1 Elementos principales del balance térmico en un destilador solar.

3.3 Transferencia de calor en destiladores solares

La transferencia de calor en un destilador solar se puede clasificar en términos de mecanismos interno y externos. Los mecanismos de transferencia de calor externos están principalmente gobernados por los procesos de conducción, convección y radiación, las cuales son independientes uno de otro. Esto ocurre fuera del destilador, desde la cubierta y del fondo hacia el ambiente. Los mecanismos de transferencia de calor internos ocurren dentro del destilador y estos son la radiación, la convección y evaporación. En este caso la transferencia de calor por convección ocurre simultáneamente con la evaporación.

El balance energético en cada uno de los elementos (condensador, salmuera y fondo) se hace con fundamento en el principio básico de la ley de conservación de energía. El balance de energía se plantea con base en un sistema de tres

ecuaciones diferenciales de parámetros concentrados, cada elemento se representa con un valor de temperatura.

El uso de parámetros concentrados es una práctica establecida (**Porta 1997**), los modelos matemáticos de este tipo se conocen como modelos de Cooper, quien probablemente fue el primero en dar a este enfoque amplia difusión.

El balance térmico en el condensador está dado por la ecuación 3.2 y representa la cantidad de calor acumulado por unidad de área horizontal en el condensador, esta cantidad de calor se determina por la energía solar disponible menos las pérdidas al ambiente y a la salmuera, establecidas por los coeficientes globales de transferencia de calor y sus diferencias de temperaturas respectivamente

$$U_{SC}(T_s - T_C) + a_c G - U_{CA}(T_C - T_A) = m_c c_c \frac{dT_C}{dt} \quad (3.2)$$

donde

U_{SC}	Coefficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta
U_{CA}	Coefficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente
T_s	Temperatura de la salmuera
T_C	Temperatura de la cubierta
T_A	Temperatura ambiente
a_c	Coefficiente de absorción para la cubierta
G	Radiación solar en el plano inclinado

m_c Masa de la cubierta
 c_c Calor específico de la cubierta

Y

$$a_c = \alpha_c(1 - \rho_c) \quad (3.3)$$

aquí

α_c Absortancia de la cubierta
 ρ_c Reflectancia de la cubierta

La energía acumulada por unidad de área en la salmuera se determina mediante la diferencia entre la energía solar transmitida por el condensador y las pérdidas al vidrio y al fondo que se calculan con base en las diferencias de temperatura, y en los coeficientes globales de transferencia de calor.

$$a_s G - U_{sc}(T_s - T_c) - U_{cf}(T_s - T_f) = m_s c_s \frac{dT_s}{dt} \quad (3.4)$$

donde

U_{sf} Coeficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el fondo
 T_f Temperatura del fondo
 a_s Coeficiente de absorción para la salmuera
 m_c Masa de la salmuera

c_s Calor específico de la salmuera

Además

$$a_s = \alpha_s \tau_c (1 - \rho_c) (1 - \rho_s) \quad (3.5)$$

en la que

α_s Absortancia de la salmuera

τ_c Transmitancia de la cubierta

ρ_c Reflectancia de la salmuera

En el fondo del destilador, la energía acumulada por unidad de área está dada por la fracción de la energía solar que alcanza el fondo, determinada por las propiedades ópticas tanto de la salmuera como del condensador, menos las pérdidas térmicas al medio ambiente y a la salmuera calculadas con las diferencias de temperaturas y los coeficientes globales de transferencia de calor.

$$a_F G + U_{SF} (T_S - T_F) - U_{FA} (T_F - T_A) = m_{FCF} \frac{dT_F}{dt} \quad (3.6)$$

donde

U_{FA} Coeficiente global de transferencia de calor entre el fondo y el medio ambiente

a_F	Coefficiente de absorción para el fondo
m_f	masa del fondo
c_F	Calor específico del fondo

El coeficiente del fondo se define por la ecuación 3.7

$$a_F = \alpha_F \tau_C \tau_S (1 - \rho_C)(1 - \rho_S)(1 - \rho_F) \quad (3.7)$$

en la que

α_F	Absortancia del fondo
τ_S	Transmitancia de la salmuera
ρ_F	Reflectancia del fondo

3.4 Otras aplicaciones de la energía solar

Existen diferentes aplicaciones de la energía solar, tal es el caso de los colectores solares, los cuales son un tipo especial de intercambiadores de calor que transforman la energía solar en calor. Las mayores aplicaciones de estos sistemas es el calentamiento de agua, calentamiento de edificios, calentamiento de aire para proceso de secado y procesos industriales de calentamiento. La orientación de estos sistemas depende de la ubicación geográfica, de manera tal que los rayos del sol lleguen lo más perpendicularmente posible al colector a lo largo del día. Otra aplicación de la energía solar la encontramos en los estanques solares, estos son grandes cuerpos de salmuera que tienen un arreglo tal que los gradientes de temperatura se encuentran inversos a lo normal, es decir, las capas más calientes se encuentran en el fondo del estanque. Estos sistemas se emplean para generar energía, producción de sal y

proveer de energía térmica a edificios. En Israel existen dos grandes estanques solares construidos en el área del mar muerto, uno de 40,000 m² y otro de 210,000 m², empleados para la generación de energía, estos dos estanques generan juntos 5 MW. En los procesos evaporativos por energía solar, además de la destilación de agua de mar para producir agua fresca, existe la evaporación de salmuera concentrada para producir sal y el secado para remover humedad de sólidos. La energía solar, se puede emplear también en ciclos de enfriamiento, ya sea en refrigeración para la conservación de alimentos o para crear confort en habitaciones (**Duffie, 1991**).

Capítulo 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Planteamiento del problema

Se desea determinar experimentalmente las variaciones en la producción de agua destilada de un destilador solar de campo de doble pendiente al cambiar su orientación.

4.2. Objetivos

Objetivo General

Determinar experimentalmente las variaciones en la producción de un destilador solar cambiando su azimuth en cuatro orientaciones: E-O, N-S, NE-SO y NO-SE.

Objetivos Específicos

- Montar la instrumentación necesaria para la medición automática de los parámetros climáticos y físicos de un destilador solar de campo, que son: temperaturas del fondo, de la película de agua a destilar, de las placas condensadoras y del ambiente, velocidad y dirección de viento, radiación solar y destilado.
- Realizar pruebas experimentales de adquisición de datos.
- Desarrollo de corridas experimentales y adquisición de información con el destilador de campo sujeto a diferentes condiciones ambientales y de orientación.
- Análisis y procesamiento continuo de la información obtenida mediante paquetería computacional.

- Presentación de un programa de computo para el cálculo de la caída en producción de un destilador solar por efecto de la recarga de salmuera a diferentes horas.

4.3. Hipótesis

La producción en un destilador solar de doble pendiente depende de los niveles de radiación solar, la dirección y velocidad del viento, así como de la orientación de éste con respecto al sol debido a la insolación diferencial de los condensadores.

4.4. Equipos y materiales

Para el desarrollo de los experimentos se empleó un destilador solar de campo de doble pendiente orientable con las siguientes dimensiones interiores: 3.64 m de largo por 2.42 m de ancho, la altura de la cavidad es de 1.25 m, las placas condensadoras son de vidrio de 5 mm de espesor con un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, el fondo tiene una membrana impermeable y se encuentra aislado térmicamente con madera y poliestireno para evitar las pérdidas por conducción al ambiente, en la figura 4.1 se muestran las dimensiones exteriores del destilador.

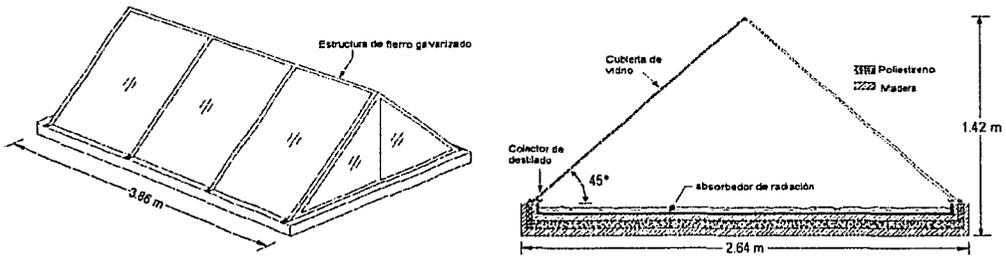


Figura 4.1 Dimensiones externas del destilador solar.

La superficie absorbadora del fondo es una membrana preparada con tela de rayón, aluminio y silicón negro.

Para medir la velocidad del viento se utilizó un anemómetro de tres copas con un sensor tipo generador eléctrico que produce una onda de salida con pulsos cuya frecuencia es proporcional a la velocidad de giro.

La dirección de viento se midió con un sensor que tiene una veleta acoplada a un reóstato cuya resistencia es proporcional a su dirección. El reóstato se alimenta con un voltaje regulado y su salida variable se conecta a un circuito convertidor analógico – digital de 16 bits. Este dato digital se codifica para ser enviado a la computadora.

Los datos de radiación solar se obtuvieron con un piranómetro comercial tipo fotodiodo de silicio, cuya respuesta espectral es de 280 a 2800 nm. Se utiliza un convertidor de corriente a voltaje ya que la salida de este instrumento es una corriente eléctrica muy pequeña, del orden de $100 \mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$, proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente.

Se utilizaron termopares tipo J, calibre 30, para medir las temperaturas. El voltaje de salida de los termopares se conectó a un módulo acondicionador multicanal que proporciona la compensación electrónica necesaria para cancelar el efecto de los pequeños voltajes indeseables que aparecen en las uniones termométricas adicionales de las conexiones del circuito. Las entradas se multiplexan y se codifica la información para ser enviada a la computadora.

La producción se midió con un equipo especial (desarrollado en el CIBNOR) que mide la producción acumulada de destilado de cada condensador. Su principio de funcionamiento está basado en la presión hidrostática ejercida por una columna de agua. Mediante un sensor de presión situado en el fondo de un recipiente y calibrado adecuadamente se obtiene un voltaje proporcional al peso de la columna de agua.

La unidad de control y registro tiene como función supervisar y controlar las tareas de medición del sistema. Para esto, se cuenta con una computadora personal con puerto serie, un programa que opera bajo ambiente Windows y un módulo de conversión del protocolo de comunicaciones RS232 a un protocolo más adecuado RS485.

Se utilizó una celda solar y una batería de 12 V de ciclo profundo para alimentar los circuitos de medición. De esta forma se evita el ruido eléctrico que provoca una línea de 60 Hz, por lo tanto las señales son de mejor calidad, además se evita la dependencia de la red de energía eléctrica en el sitio de medición.

4.5. Metodología

Se instaló la instrumentación para medir temperaturas dentro del destilador, para ello se colocaron 10 termopares, tres en el fondo, tres para medir la temperatura del agua procurando que quedaran por encima de los termopares colocados en el fondo, y dos termopares para cada una de las placas condensadoras. Los termopares se fijaron utilizando una resina epóxica con una conductividad térmica adecuada. También se instalaron los equipos y la instrumentación para medir las variables del clima, como es la radiación solar, la velocidad y dirección del viento así como la temperatura ambiente, estos equipos se instalaron cerca del destilador dentro de una caseta (Fig.4.2) para resguardarlos del ambiente. Una vez que se montó todo el equipo e instrumentos se efectuaron corridas de prueba para detectar posibles fallas en los equipos y en los sistemas de adquisición y registro de datos.

El equipo que mide la producción de destilado se probó y calibró en el laboratorio, esto se hizo añadiendo agua a intervalos de 5 minutos, la cantidad añadida se comparó con la lectura que registraba el sistema.

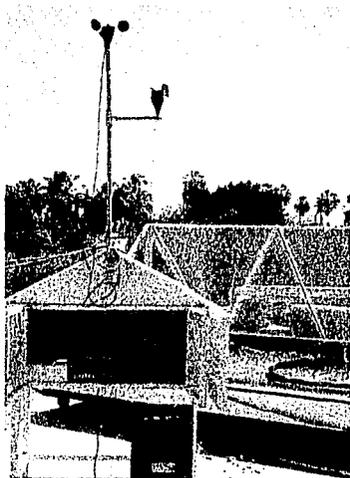


Figura 4.2 Vista de los módulos y sistemas de adquisición de datos bajo resguardo del medio ambiente.

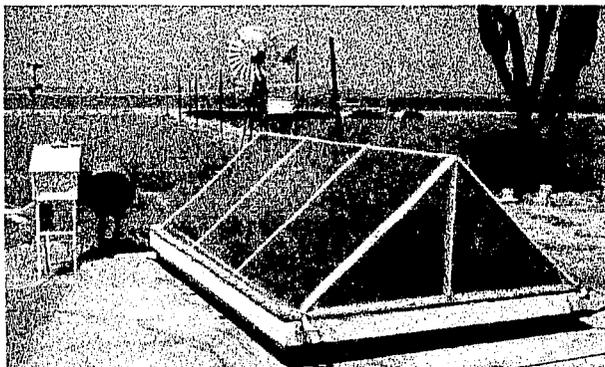


Figura 4.3 Montaje experimental utilizado.

Una vez que se efectuaron las corridas de prueba y se corrigieron las fallas que se detectaron se procedió a realizar las pruebas de destilación.

La primera corrida experimental se llevó a cabo con las placas condensadoras orientadas Este-Oeste. Se cargó el destilador con agua corriente, la película de agua fue de 6 cm. Por debajo de cada uno de los colectores de destilado (los cuales sobresalen por la parte trasera del destilador) se fijó una copa de plástico que cuenta en la parte inferior con una manguera delgada que va hasta los medidores de destilado, se procuró que estas mangueras quedaran bien tensas para evitar la acumulación de agua en ellas. Los medidores de destilado se colocaron por un lado del destilador y enterrados para que el destilado que es colectado baje hasta ellos a través de las mangueras por gravedad. Estas pruebas se llevaron a cabo manteniendo el tirante de agua constante, esto se aseguró con un flotador dentro del destilador y un tanque (Fig.4.3) con agua para la reposición.

La lectura y registro de datos se efectuó cada minuto y de forma automatizada contando para ello con sistemas de adquisición de datos y una computadora para el registro y visualización de la información. Se dejó correr las pruebas por varios días para obtener información completa de 24 horas a partir de la salida del sol y de días despejados.

Para evitar que los medidores de nivel se derramaran se vaciaron cada 24 horas con ayuda de una bomba sumergible, esta operación se llevó a cabo durante las primeras horas de la mañana (entre las 8:00 y 9:30 a.m.) ya que a esta hora la producción es nula prácticamente.

Al finalizar las prueba se vació el destilador para darle mantenimiento y limpieza así como a los equipos y hacer cualquier tipo de ajuste que sea necesario para la siguiente prueba.

Se siguió el mismo procedimiento para la siguiente prueba pero con orientación de los condensadores Norte-Sur.

Se repitió la misma metodología para otras dos orientaciones con respecto a las placas condensadoras: NE-SO y NO-SE (Fig. 4.4).

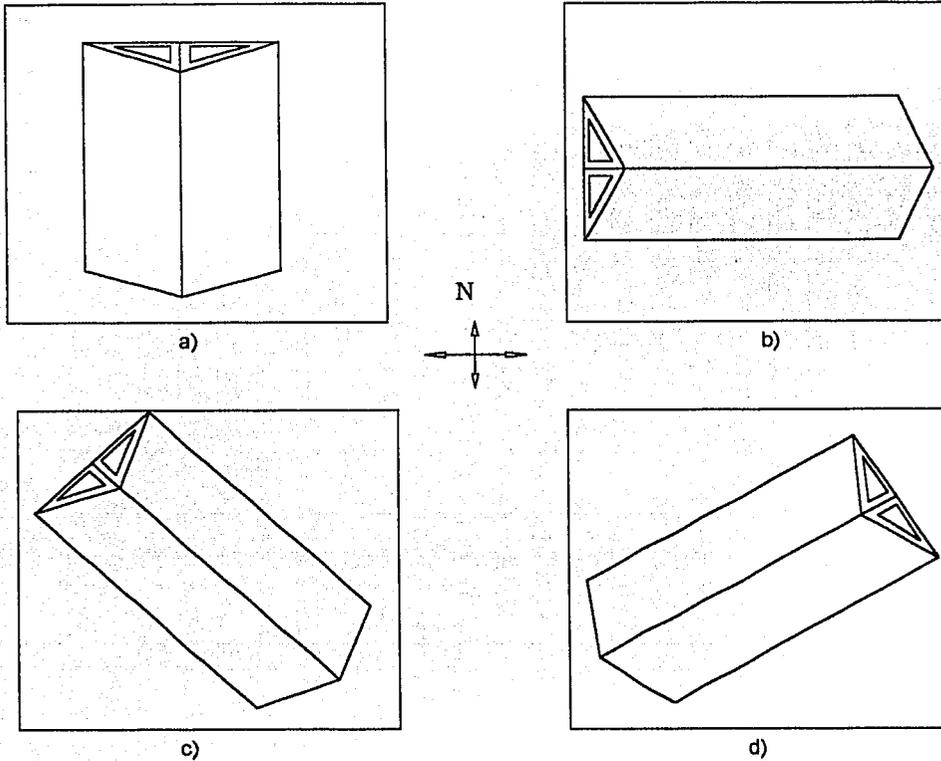


Figura 4.4 Orientaciones del destilador a las que se llevaron a cabo las pruebas, orientación de los vidrios condensadores a) Este-Oeste, b) Norte-Sur, c) Suroeste-Noreste, d) Noroeste-Sureste.

4.6. Resultados experimentales

En esta sección se presentan los resultados experimentales que permiten llegar a los objetivos planteados anteriormente así como evaluar la hipótesis planteada para este trabajo. Durante el desarrollo de este trabajo experimental se adquirió amplia experiencia en los parámetros que intervienen en el proceso de la destilación solar, como también en la metodología y control que hay que llevar a cabo para hacer las pruebas experimentales.

Los datos que aquí se presentan corresponden a cuatro orientaciones diferentes (Fig. 4.4) y para los días 20 de marzo, 25 de abril, 24 de mayo y 6 de junio del 2001.

Las corridas experimentales se efectuaron en el Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), ubicado en La Paz Baja California Sur, a una latitud 24.15° N y longitud 110.31° W.

Orientación de los condensadores Este-Oeste

La primera corrida se inició el día 20 de marzo, la orientación del destilador con respecto a las placas condensadoras fue Este-Oeste. La película de agua a destilar se mantuvo constante en 6 cm. La longitud del día solar fue de 11.95 horas.

La producción instantánea en $\text{kg/m}^2\text{-h}$ para cada una de las cubiertas condensadoras así como la producción instantánea total, se muestran en la figura 4.5, en la misma figura se muestra la radiación solar medida en W/m^2 . Como puede observarse existe una inercia térmica lo cual hace que la máxima

producción se alcance unas horas después del medio día solar, aproximadamente a las cuatro de la tarde para la cubierta orientada hacia el Este y a las 6 de la tarde para la cubierta con orientación Oeste. También se puede observar que durante las primeras horas de la mañana la producción del condensador Este es nula, esto se debe a que durante el periodo de ascenso del sol la temperatura del condensador es mayor que la del agua, ya que su inercia térmica es mucho menor (Fig. 4.6).

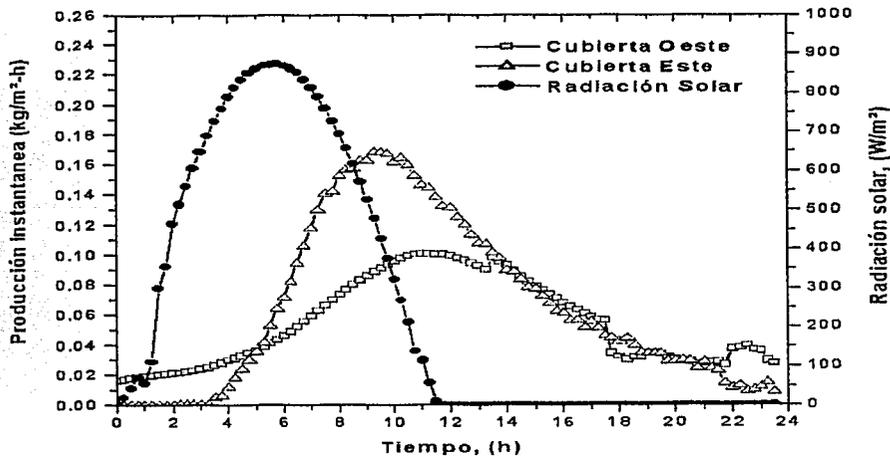


Figura 4.5 Producción instantánea ($\text{kg/m}^2\text{-h}$) para el 20 de marzo (orientación Este-Oeste de las placas condensadoras) y radiación solar (W/m^2).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

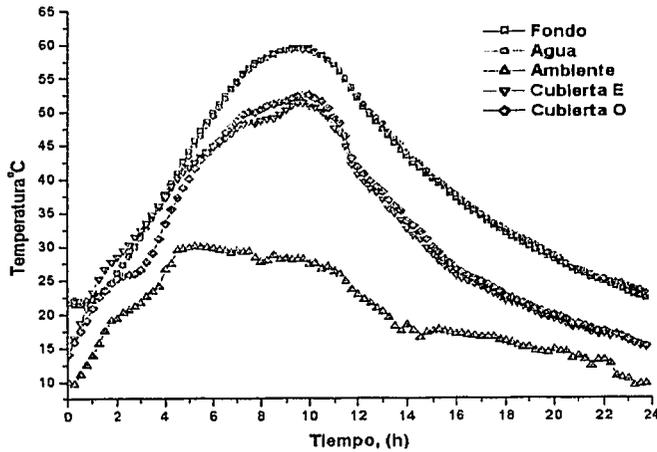


Figura 4.6 Temperaturas del ambiente, cubiertas, fondo y agua.

En el gráfico de temperaturas no se aprecia la diferencia de temperaturas entre el fondo y el agua pero ésta es entre 0.5 °C y 1 °C en el máximo de temperaturas.

La producción acumulada total fue de 25.17 kg en 24 horas, el área del destilador es de 8.8 m², lo que da una producción 2.86 kg/m²-día.

La velocidad del viento se pueden observar en la figura 4.7, Las velocidades fueron bajas y no sostenidas, el valor más alto que se registro fue de 2 m/s. La dirección predominante de viento es del Norte.

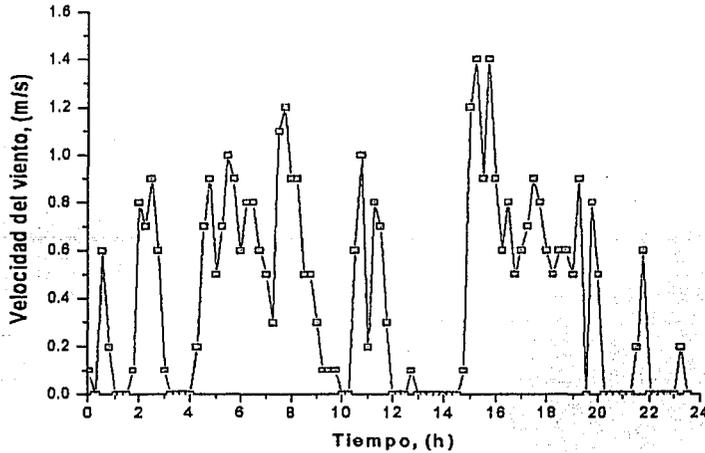


Figura 4.7 Velocidad de viento a lo largo del día.

Orientación de los condensadores Norte-Sur

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Para esta prueba se presenta información de dos días, a partir de la hora del alba del día 25 de abril hasta el alba del día 27 del mismo mes. La orientación de las cubiertas fue Norte-Sur, la película de agua a destilar se mantuvo constante en 6 cm, la duración del día para el 25 y 26 de abril fue de 12.79 y 12.81 horas respectivamente.

La radiación solar y la producción para esos dos días se muestra en la figura 4.8, la producción total acumulada fue de 57.1 kg en los dos días, lo que da una producción de 3.24 kg/m²-día. La radiación máxima fue 907 W/m².

Aquí se puede observar que la evolución en la producción para cada una de las cubiertas es muy similar. Para las dos cubiertas se tiene una una región en la

cual la producción cae después de la salida del sol, este efecto es ocasionado por la misma causa que ya se explicó para la orientación anterior. Durante las horas de ascenso de la producción la cubierta con orientación norte produce un poco más que la cubierta sur pero en la zona de descenso la producción para ambas caras es casi la misma, siendo la producción de la cubierta sur ligeramente mayor. La máxima producción se obtiene tres horas después del medio día solar para la cubierta norte y cuatro horas después para la cubierta sur.

La figura 4.9 muestra la evolución de las temperaturas en el destilador y la del ambiente a lo largo de los dos días

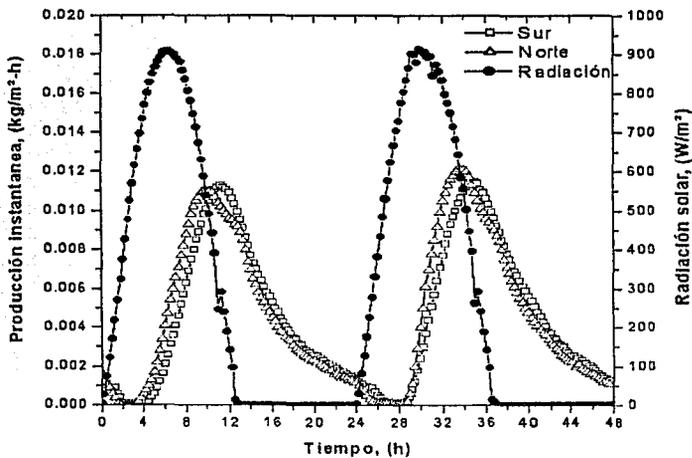


Figura 4.8 Datos de producción y radiación solar para los días 25 y 26 de abril.

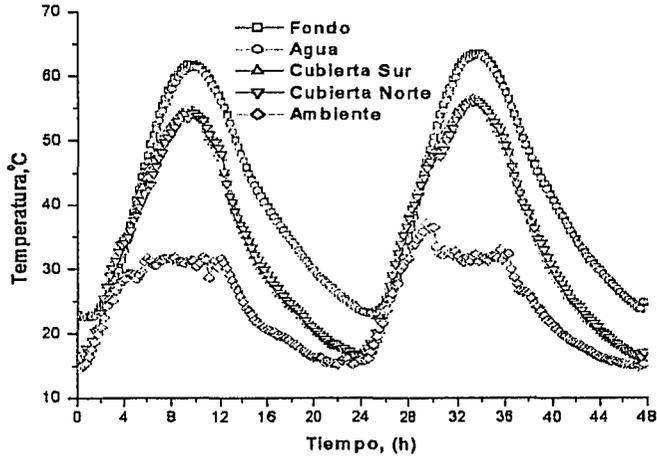


Figura 4.9 Temperaturas del destilador y del ambiente.

En esta gráfica de temperaturas se puede observar que durante la mañana las temperaturas de las cubiertas son mayores que las del fondo y el agua. También se puede ver una diferencia entre cada uno de los condensadores, como se ve la temperatura del condensador Norte es ligeramente inferior que la del Sur durante el periodo de ascenso y no se aprecia diferencia durante el periodo de descenso, esta distribución de temperaturas se ve reflejado en el gráfico de la producción.

El viento para estos días estuvo dentro del rango de 1 a 2 m/s y se llegaron a alcanzar rachas de hasta 3.5 m/s.

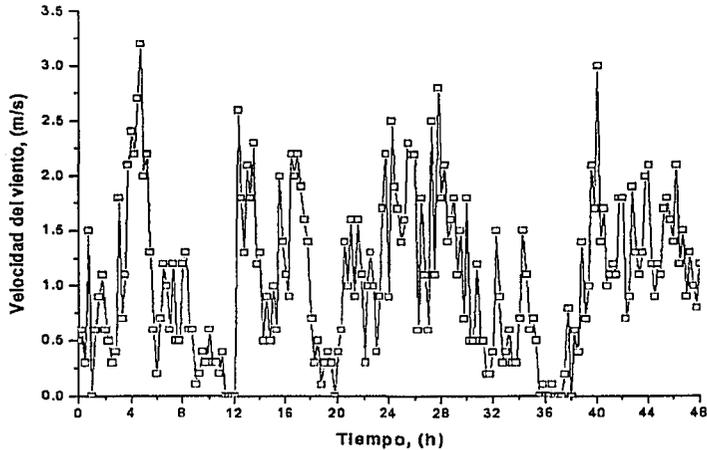


Figura 4.10 Velocidad e viento para los días 25 y 26 de abril.

La dirección de viento predominante fue del Norte.

Orientación de los condensadores Noreste-Suroeste

Esta prueba se realizó el día 24 de mayo con orientación Noreste-Suroeste de las placas condensadoras. El tirante de agua se mantuvo constante en 6 cm. La longitud del día solar fue de 13.3 horas.

La figura 4.11 presenta los datos de producción y radiación solar para este día la producción total fue de 30.42 kg en 24 horas, por lo tanto la producción por m^2 en 24 horas fue de $3.45 \text{ kg}/m^2\text{-día}$. La radiación solar máxima fue de $889 \text{ W}/m^2$.

Desde las 7 de la mañana y hasta las 10:30 de la mañana la producción en el vidrio NE es cero y aproximadamente después de las 9 de la mañana y hasta casi cerca del medio día local la producción de la cara SO decae debido a que la diferencia de temperaturas entre el agua y la cubierta disminuye.

Los máximos de producción se alcanzan a las cinco de la tarde es decir cuatro horas después del medio día solar.

La figura 4.12 muestra las temperaturas en el destilador y en el medio ambiente, como ya se explicó la caída en la producción en la cara NE es ocasionada por el aumento de la temperatura de ésta por encima de la temperatura del agua y del fondo, también se observa que al aumentar la temperatura de la otra cara y disminuir la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta provoca una caída en la producción para esta cara.

En este día la velocidad del viento fue mayor que para las corridas anteriores llegando a alcanzar valores de hasta 4.5 m/s. Durante la mañana la velocidad osciló entre 0.5 y 2 m/s y en la tarde se tuvieron las mayores velocidades que se encontraron entre 1 y 3 m/s, (Fig. 4.12). Respecto a la dirección del viento, la mayor frecuencia fue de la dirección Sur ($\pm 30^\circ$).

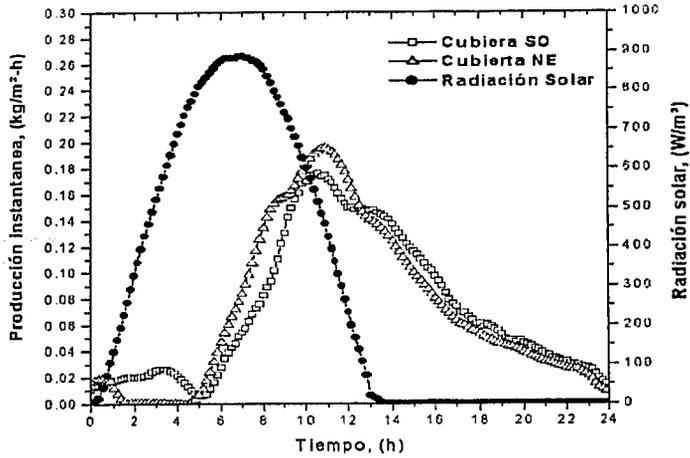


Figura 4.11 Radiación solar y producción para el día 24 de mayo.

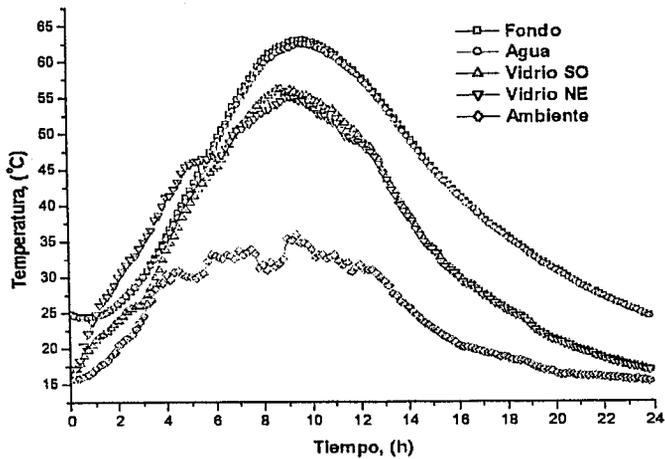


Figura 4.12 Temperaturas en el destilador y temperatura ambiente.

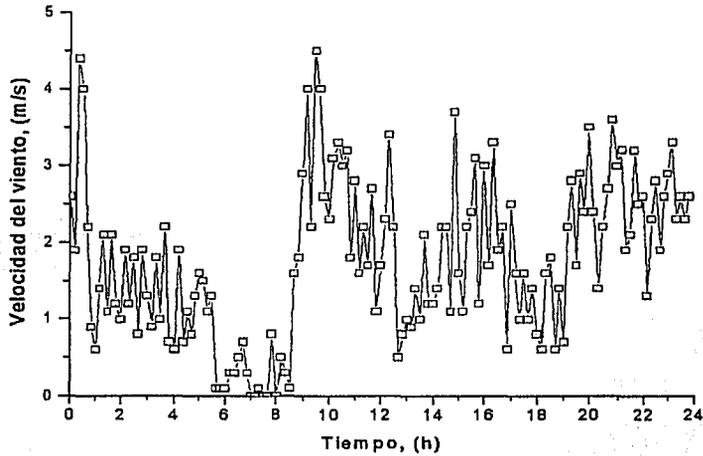


Figura 4.13 datos de velocidad de viento del día 24 de mayo.

Orientación de los condensadores Noroeste-Sureste

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al día 6 de junio, se mantuvieron las mismas condiciones de operación y con una orientación Noroeste-Sureste. La duración del día solar fue de 13.44 horas.

Los datos de producción y radiación solar se presentan en la figura 4.14.

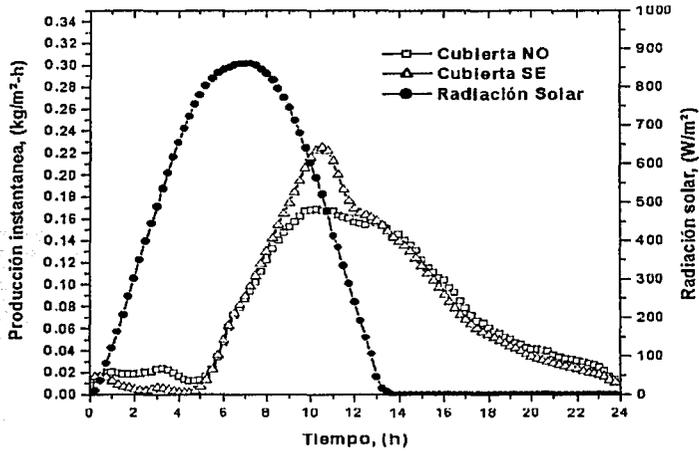


Figura 4.14 Producción instantánea radiación solar para el día 6 de junio.

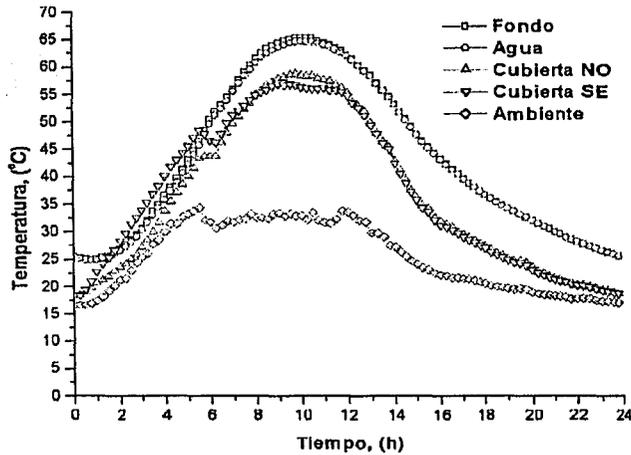


Figura 4.15 Temperatura del destilador y ambiente.

En la figura 4.15 se presentan las temperaturas de los elementos principales del destilador.

Las condiciones del viento para este día se pueden observar en el figura 4.16.

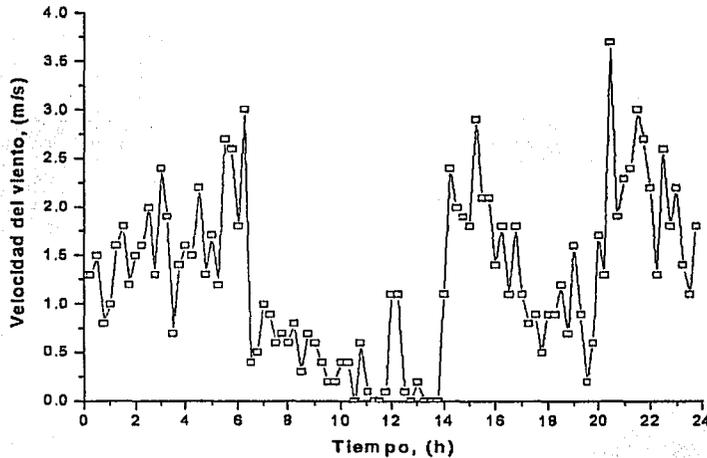


Figura 4.16 Registro de la velocidad del viento para el día 6 de junio.

En este día las mayores velocidades de viento se tuvieron durante la noche y mañana, las velocidades en estos períodos fueron oscilantes entre 0.5 y 3 m/s con rachas entre 4 y 4.5 m/s. Durante la tarde las velocidades fueron bajas, alrededor de 1 m/s.

Capítulo 5

DISCUSION DE RESULTADOS

El objetivo principal de este trabajo de tesis es encontrar si existen diferencias en la producción de un destilador solar por efecto de la orientación. Para poder hacer este análisis es necesario contar con días semejantes entre cada una de las orientaciones, sin embargo, debido a las condiciones climáticas y a fallas en los equipos e instrumentos de medición resultó difícil hacer corridas continuas, es por ello que las diferencias entre cada corrida llegan a hacer hasta de un mes.

Al revisar los resultados experimentales lo primero que se observa es el efecto de la orientación en la producción de cada uno de los condensadores. Son los condensadores con orientación Este-Oeste los que mayores diferencias presentan entre sí; como es lógico, los rayos solares inciden primeramente sobre la cubierta Este lo que provoca que la producción caiga hasta cero ya que la temperatura del condensador alcanza valores superiores a los del agua, al ir ascendiendo el sol, la temperatura del agua se incrementa, el condensador con orientación Este empieza a producir hasta que la temperatura del agua es mayor que la de él. Al cruzar el sol el cenit empieza a calentar la cubierta Oeste y la diferencia entre la temperatura del agua y de la cubierta disminuye, mientras que la diferencia entre el agua y la cubierta Este aumenta, efecto que se refleja en la producción, durante la noche las temperaturas de los vidrios condensadores tienden a igualarse lo que hace que la producción en ambas caras sea prácticamente la misma. Cabe notar que la cubierta Oeste nunca deja de producir.

Para las siguientes orientaciones notamos un comportamiento semejante en la producción para ambas caras. Para la orientación Norte-Sur, la producción en

ambas caras se vuelve nula durante las primeras horas de la mañana, por las mismas causas que se explicaron en la orientación anterior. Para las dos orientaciones siguientes sólo una de las caras deja de producir durante la mañana, pero la producción en el resto del día es muy similar, las mayores diferencias se observan en los máximos, donde la cara que deja de producir en la mañana es la que alcanza valores más altos de producción instantánea. Esto se debe a que los máximos de producción se alcanzan entre tres y cuatro horas después del medio día solar, y a esa hora los rayos solares se encuentran incidiendo sobre la cubierta contraria. Para la orientación Noroeste-Sureste durante el periodo de ascenso y descenso de la producción, no se observan diferencias, pero como ya se comentó, en el máximo las producciones se despegan.

En cuanto a la producción nocturna para cada una de las orientaciones esta se puede observar en la siguiente tabla

Tabla 5.1 Producción nocturna

Orientación	Producción Condensador 1 (kg)	Producción Condensador 2 (kg)	Producción Cond1+Cond2 (kg)
O-E	5.84	5.66	11.49
S-N	5.80	5.08	10.88
SO-NE	5.84	5.02	10.86
NO-SE	5.61	4.99	10.61

Tabla 5.2 Porcentaje de producción nocturna.

Orientación	% Producción Condensador 1	% Producción Condensador 2	% Producción Cond1+Cond2
O-E	50.67	41.44	45.66
S-N	40.21	34.43	37.28
SO-NE	38.60	32.85	35.71
NO-SE	34.52	30.35	32.42

Los porcentajes de los condensadores es la proporción de producción nocturna con respecto de la producción total para ese mismo condensador.

Es el condensador con orientación Oeste con el más alto porcentaje de producción nocturna, la mitad de su producción total, seguido por el condensador Este con un porcentaje muy alto de 41.44%. Mientras que la orientación SE presenta el menor porcentaje de producción durante el periodo sin radiación solar, con el 30.35% del total de su producción.

Con respecto a la producción total nocturna, es la orientación O-E con el mayor porcentaje con respecto a la producción total de 24 horas, para esta orientación la producción después del ocaso y hasta el alba nuevamente es casi la mitad del total, 45.66%, le siguen las orientaciones S-N con el 37.28% SO-NE con el 35.71% y finalmente la orientación NO-SE con el 32.42%.

Con respecto a las temperaturas entre en el fondo y agua, la diferencia entre estos dos elementos es pequeña, la máxima diferencia que se alcanza llega a ser de 1 °C, Figura 5.1,

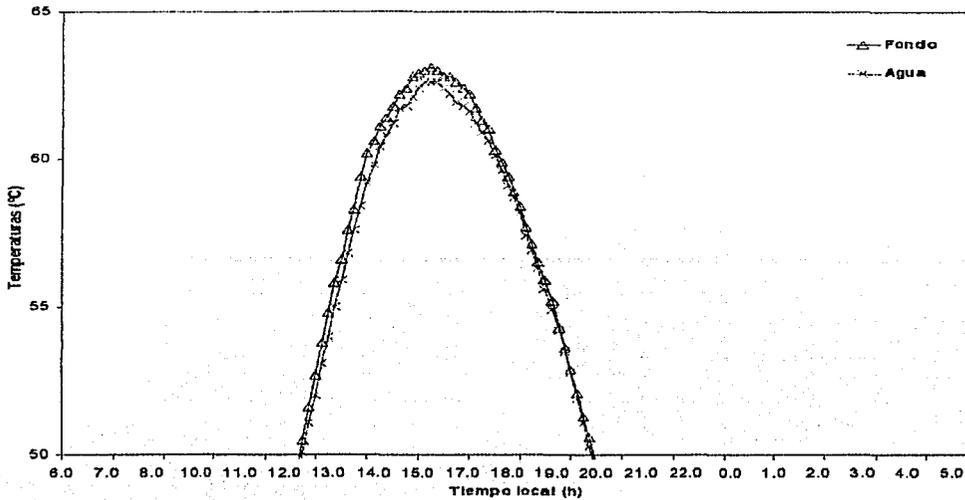


Figura 5.1 Diferencia de temperatura entre fondo y agua.

Durante la noche y las primeras horas de la mañana no existe una diferencia notable entre la temperatura del fondo y del agua.

Para comparar las variaciones en la producción entre cada orientación, es necesario hacer un análisis de las eficiencias, en función de la producción diaria por metro cuadrado, de la cantidad de energía recibida y de la entalpía de evaporación del agua, tanto de manera general como de forma separada para cada uno de los condensadores. Hacer esto solamente con los datos de producción diaria puede ser engañoso, ya que los niveles de radiación y duración del día solar varían en cada prueba.

La eficiencia en un destilador solar tomando en cuenta la producción de agua destilada diaria por unidad de superficie y la energía total recibida en el destilador, es:

$$\eta = \frac{M}{E} h_{fg} \quad (5.1)$$

donde:

η = eficiencia

M = Producción diaria de agua destilada [kg/m² día]

E = Energía recibida en el destilador [kJ/m² día]

h_{fg} = Entalpía de evaporación [kJ/kg]

Por lo que para calcular la eficiencia de la superficie del evaporador se tiene que:

$$\eta_e = \frac{M_e}{E} h_{fg} \quad (5.2)$$

donde:

η_e = eficiencia considerando la superficie de evaporación

M_e = Producción de agua destilada por unidad de superficie de evaporador [kg/m² día]

E = Energía recibida en el destilador [kJ/m² día]

h_{fg} = Entalpía de evaporación [kJ/kg]

Y para la superficie de los condensadores:

$$\eta_e = \frac{M_e}{E} h_{fg} \quad (5.3)$$

donde:

η_e = eficiencia considerando la superficie del condensador

M_e = Producción de agua destilada por unidad de superficie de condensador [kg/m² día]

E = Energía recibida en el destilador [kJ/m² día]

h_{fg} = Entalpía de evaporación [kJ/kg]

En la siguiente tabla se muestran los datos de producción diaria para cada una de las orientaciones y para el área de evaporación y condensación, la energía recibida por el destilador, y la entalpía de evaporación.

Tabla 5.3 Valores diarios de producción total, de cada uno de los condensadores, energía recibida por el destilador y entalpía de evaporación

Orientación	Producción total (kg/m ² -día)	Condensador		Energía (MJ/m ² día)			Entalpía (MJ/Kg)
		1	2	Evap.	Cond 1	Cond 2	
O-E	2.86	1.95	2.31	22.62	30.09	14.40	2.40
S-N	3.32	2.45	2.5	25.45	22.04	17.91	2.43
SO-NE	3.46	2.56	2.59	25.68	26.84	15	2.39
NO-SE	3.72	2.76	2.79	25.04	30.65	13.28	2.39

Entonces de acuerdo a las ecuaciones 5.2 y 5.3 se obtienen las eficiencias del evaporador y condensadores para cada orientación.

Tabla 5.4 Eficiencia del evaporador, y condensadores, (1 para la primera orientación señalada y 2 para la siguiente).

Orientación	η Evaporador	η Condensador 1	η Condensador 2
O-E	0.30	0.16	0.39
S-N	0.32	0.27	0.34
SO-NE	0.32	0.23	0.41
NO-SE	0.36	0.22	0.50

Como se puede apreciar la mayor eficiencia considerando el evaporador se obtiene para la orientación NO-SE, además es el condensador orientado hacia el SE es el que mayor eficiencia presenta.

En la figura 5.2 puede apreciarse el comportamiento de la eficiencia de manera conjunta para cada uno de los elementos del destilador, así como para cada una de las orientaciones. Con respecto al evaporador es la orientación NO-SE la que mayor eficiencia presenta, mientras que la menor eficiencia se obtiene para la orientación E-O.

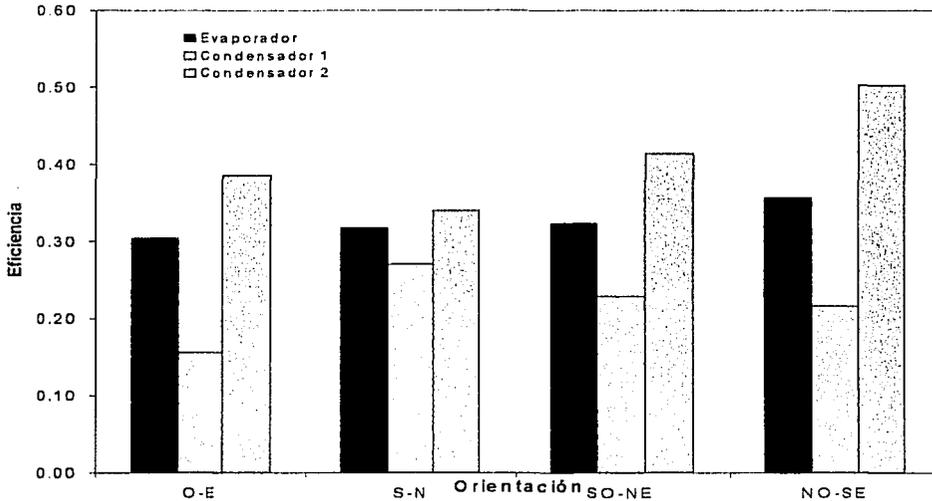


Figura 5.2 Eficiencias del evaporador y placas condensadores para cada una de las orientaciones.

La figura permite analizar de manera conjunta el comportamiento del destilador, podemos comparar el funcionamiento de cada uno de los condensadores y del evaporador para una orientación en particular o hacer comparaciones entre cada orientación.

Las eficiencias de los evaporadores en las tres primeras orientaciones no cambian mucho entre sí, pasando de 0.30 para la orientación E-O a 0.32 para la orientación S-N y SO-NE, y para la orientación NO-SE la eficiencia del evaporador es de 0.36.

Es el condensador orientado hacia el NO es el de mayor eficiencia, alcanzando el valor de 0.5, y la orientación Oeste la de menor eficiencia, siendo ésta de 0.16.

Si se observa el comportamiento de los condensadores para una misma orientación, se ve que uno de ellos tiene eficiencia mucho mayor que la del otro, sin embargo, para el caso de la orientación Norte-Sur, la diferencia no es muy grande, de la tabla 5.3, se ve que la radiación y la producción es muy similar para ambos condensadores, mientras que para el resto de las orientaciones, existen grandes diferencias en los niveles de radiación que se obtuvieron en cada uno de los condensadores.

En la figura 5.3 se compara la eficiencia del evaporador y de los condensadores en conjunto. La producción total de los condensadores en kg/m^2 es la suma de las producciones de cada uno de los condensadores entre la suma de las áreas.

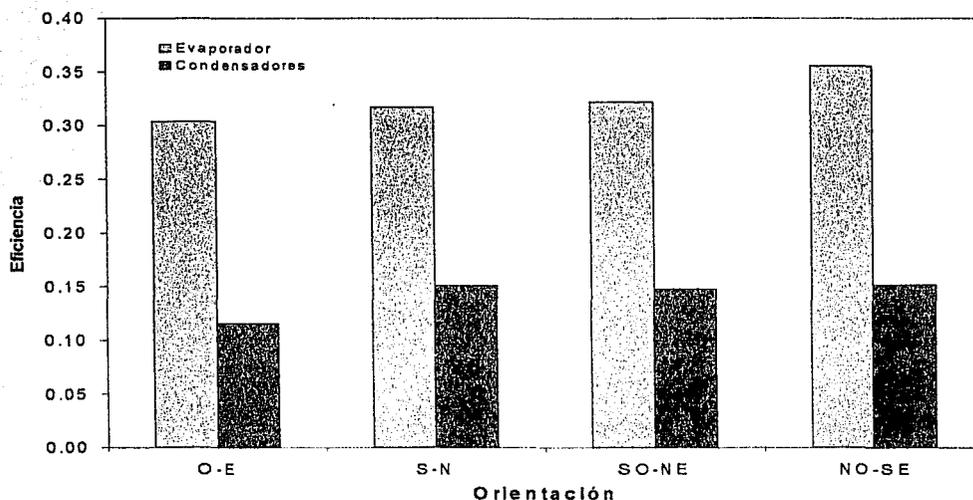


Figura 5.3 Eficiencias del evaporador y condensadores en conjunto.

La eficiencia de los condensadores calculada con esta producción da valores idénticos para las orientaciones S-N, SO-NE y NO-SE, es decir, 0.15. Mientras

que la orientación O-E tiene la eficiencia más baja con un valor de 0.12, tabla 5.5 y 5.6.

Tabla 5.5 producción en kg/m²-día del evaporador y de los dos condensadores en conjunto.

Orientación	Producción total (kg/m ² día)	Cond1+Cond2 (kg/m ² día)
O-E	2.86	2.13
S-N	3.32	2.48
SO-NE	3.46	2.58
NO-SE	3.72	2.77

Tabla 5.6 Eficiencia del evaporador, y condensadores en conjunto.

Orientación	η Evaporador	η Cond1+Cond2
O-E	0.30	0.12
S-N	0.32	0.15
SO-NE	0.32	0.15
NO-SE	0.36	0.15

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante trabajo experimental se pudo observar los efectos de la orientación en la producción de un destilador solar de doble pendiente.

Los equipos y sistema instalados, para la medición y registro automático de las variables físicas y del clima que influyen en el proceso de la destilación solar, permitieron obtener información altamente confiable para evaluar las diferencias en el desempeño de un destilador solar de geometría triangular, así como de cada uno de los condensadores, al cambiar su orientación.

Las producciones nocturnas fueron muy altas en general, pero sobresale la orientación E-O, la cual alcanza casi la mitad de la producción total, es decir 45.66%, y el condensador Oeste cuyo valor de producción nocturna es de 50.67% de su producción total en ese día.

Mediante un análisis de la eficiencia para cada orientación, se encontró que es la orientación NO-SE la que mayor eficiencia presenta, y es el condensador SE, en particular, el de eficiencia más alta, con valores de 0.36 y 0.50 respectivamente. Sin embargo, al evaluar de manera conjunta los condensadores, no se observan diferencia en la eficiencia, entre las orientaciones S-N, SO-NE y NO-SE. Para estas tres orientaciones la eficiencia de los condensadores es de 0.15 y para la orientación O-E la eficiencia de los condensadores en conjunto es de 0.12.

Sobre la base de los resultados experimentales obtenidos se puede concluir que la producción de agua destilada en un destilador solar de doble pendiente está en

función de los niveles de radiación. Los efectos de la orientación se ven mayormente reflejados en el desempeño de los condensadores, cuyas diferencias son ocasionadas por la insolación diferencial en cada uno de ellos, según la orientación. La dirección y velocidad de viento no se ve reflejada en la producción.

Se recomienda, para tener un mayor sustento en estas conclusiones, procurar hacer trabajo experimental con diferentes orientaciones dentro de un mismo periodo estacional. En cuanto a los instrumentos de medición se recomienda, sobre todo en aquellos que se colocan dentro del destilador aislarlo muy bien del agua, ya que esto puede ocasionar daños en ellos y producir error en las mediciones, además de retrasar el trabajo experimental, por lo que desde un principio debe escogerse aquellos que sean altamente resistentes al trabajo en agua.

NOMENCLATURA

A	Área de sección transversal [m ²].
a _c	Coefficiente de absorción para la cubierta.
a _F	Coefficiente de absorción para el fondo.
a _s	Coefficiente de absorción para la salmuera.
c	Velocidad de la luz [km/s].
c _c	Calor específico de la cubierta [J/kg K].
c _F	Calor específico del fondo [J/kg K].
c _s	Calor específico de la salmuera [J/kg K].
d ₀	distancia media entre la tierra y el sol [km].
D _{AB}	Difusividad másica de A en B [m ² /s].
E	Energía recibida en el destilador [kJ/m ² día].
E _b	Potencia emisiva total [J/h m ²].
F	Flujo de radiación solar fuera de la atmósfera [W/m ²].
G	Radiación solar en el plano inclinado [W/m ²].
g	Aceleración normal de la gravedad [m/s ²].
G	Radiación solar sobre un plano horizontal [W/m ²].
G ₀	Constante solar [W/m ²].
G _{cb}	Radiación solar directa [W/m ²].
G _d	Radiación solar difusa [W/m ²].
Gr	Número de Grashof.
h	Coefficiente de transferencia de calor [W/m ² K].
h _{fg}	Calor de latente de evaporación [kJ/kg].
L	Longitud característica [m].
Le	Número de Lewis.
m _c	Masa de la cubierta [kg].
m _s	Masa de la salmuera [kg].
M _e	flujo másico por metro cuadrado [kg/m ² -día].
m _f	masa del fondo [kg].
n	enésimo día del año.
Nu	Número de Nusselt.
p	Presión [Pa].
q	Flujo de calor por unidad de área [W/m ²]
Q	Flujo de calor [W].
Re	Número de Reynolds.
Sc	Número de Schmidt.
Sh	Número Sherwood.
T	Temperatura [K].
t	Tiempo [s].
T _A	Temperatura ambiente [K].
T _C	Temperatura de la cubierta [K].
T _F	Temperatura del fondo [K].
T _S	Temperatura de la salmuera [K].
u	Velocidad másica promedio de la componente en x [kg/s].

u_0	Velocidad de referencia [m/s].
U_{CA}	Coefficiente global de transferencia de calor entre la cubierta y el ambiente [W/m ² K].
U_{FA}	Coefficiente global de transferencia de calor entre el fondo y el medio ambiente [W/m ² K].
U_{SC}	Coefficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y la cubierta [W/m ² K].
U_{SF}	Coefficiente global de transferencia de calor entre la salmuera y el fondo [W/m ² K].
v	Velocidad másica promedio de la componente en y [kg/s].
X	Fuerzas de cuerpo total actuando en la dirección x [N].
Y	Fuerzas de cuerpo total actuando en la dirección y [N].
α	Absortancia.
α_C	Absortancia de la cubierta.
α_F	Absortancia del fondo.
α_S	Absortancia de la salmuera.
β	Coefficiente de expansión térmica [K ⁻¹].
λ	Longitud de onda [m].
μ	Viscosidad del fluido [Pa·s].
$\mu\Phi$	Término de disipación viscosa.
ν	Frecuencia .
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² K ⁴].
ρ	Densidad total [kg/m ³].
ρ	reflectancia
ρ_C	Reflectancia de la cubierta.
ρ_S	Reflectancia de la salmuera.
ρ_F	Reflectancia del fondo.
τ	Transmitancia.
τ_b	Transmitancia atmosférica directa.
τ_d	Transmitancia atmosférica difusa.
τ_C	Transmitancia de la cubierta.
τ_S	Transmitancia de la salmuera.
ϵ	Emisividad.

BIBLIOGRAFÍA

- Akash, B. A. et al, "Experimental Study of the Basin Type Solar Still Under local Climate Conditions", Energy Conversion & Management, 41, 883-990, (2000).
- Ali, H. M., "Effect of Forced Convection Inside the Solar Still on Heat and Mass Transfer Coefficients", Energy Conversion and Management, 34 (1), 71-73, (1993).
- Cooper, P. I., "The Absorption of Radiation in Solar Still", Solar Energy, 12, 333-346, (1969).
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., "Solar Engineering of Thermal Processes", 2 edición, John Wiley & Son, USA, 919 pp, 1991.
- El-Sebaili, A. A., "Effect of Wind Speed on Some Design of Solar Stills", Energy Conversion & Management, 41, 523-538, (2000).
- Fernández, J. L., "Destiladores Solares de Flujo Continuo en circuitos abiertos", Memorias del XIV Congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, pp 218-222, Guanajuato, Gto, sep 1988.
- Fernández, J. L., "Introducción al Estudio de los Sistemas Solares Activos", Series del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Publicación D-26, 109 pp, 1987.
- Fernández, J. L., Chargoy, N., "Análisis Experimental de un Destilador Solar Indirecto", Memorias XII Reunión Nacional de Energía Solar, pp 274-278, Puebla, oct 1988.
- Fernández, J. L., Chargoy, N., "Multi-stage, Indirectly Heated Solar Still", Solar Energy, Journal of the International Solar Energy Society, Pergamon Press, 44 (4), 215-223.
- Garcell, L. P. et al, "Transferencia de Cantidad de Movimiento, Calor y Masa", IPN y Ministerio de Educación Superior de Cuba, México, 347 pp, 1998.
- Instituto de Investigaciones en Materiales y la Unidad Académica de los Ciclos Profesionales y de Posgrado del CCH, "Notas del Curso de Actualización en Energía Solar 1996", UNAM, México, 485 pp, 1996.
- Malik, M. A. S. Et al, "Solar Distillation", Pergamon Press, Great Britain, 175 pp, 1982.

- McCracken, H., "Distillate Production of a Simple Direct Solar Still", Sunworld, 14 (3), (1990).
- Morse, R. N., Read, W. R., "A Rational Basis for the Engineering Development of a Solar Still", Solar Energy, 12, 5-17, (1968).
- Ozidik, M. N., "Heat Transfer a Basic Approach", McGraw-Hill, USA, 780 pp, 1985.
- Porta Gandara, M. A., "Mecanismo de transferencia en destiladores solares someros", tesis de doctorado, Facultad de ingeniería, UNAM, México D.F., 120 pp, 1997.
- Porta, M. A., Fernandez, J. L. y Chargoy, N., "La Experiencia en el Diseño y Operaciones de Destiladores Solares", Información Tecnológica, 9 (4), 1998, 261-266.
- Rincon, M. E., "Estado del Arte de la Investigación en Energía Solar en México", Cuadernos de Física, Fundación ICA, México, 75 pp, 1999.
- Singh, A. K., et al, "Optimization of Orientation for Higher Yield of Solar Still for a Given Location", Energy Conversion & Management, 36 (3), 1995, 175-187.
- Tayed, A. M., "Performance Study of Some Designs of Solar Stills", Energy Conversion and Management, 34 (1), 73-79, 1993.
- Thomas, C. L., "Heat Transfer", Pretinzel Hall, New Jersey, USA, 804 pp, 1992.
- Tiwari, G. N., Suneja, Sangeeta, "Solar Thermal Engineering Systems", Narosa, New Delhi, 396 pp, 1997.

Anexo I

PROGRAMA DE COMPUTO

Se presenta un programa de computo en lenguaje turbo basic, en el cual se pueden apreciar las caídas de la producción en un destilador solar debido a malas prácticas de operación durante la recarga de salmuera.

El propósito de este programa es demostrar que existen un tiempo óptimo para la limpieza y recarga del destilado, y hacerlo fuera de este periodo repercute directamente en la producción.

Determinar el tiempo idóneo de carga del destilador, complementa de manera importante el trabajo realizado en esta tesis, ya que una adecuada operación del destilador ayuda a maximizar la producción del destilador.

Cálculo de la radiación solar instantánea y temperatura ambiente

```
cls
print "Programa para el cálculo de la radiación solar instantánea"
```

```
'-----Entrada de datos-----'
```

```
OPEN "RADSOLAR.dat" FOR OUTPUT AS #1
OPEN "TAMBIENT.DAT" FOR OUTPUT AS #2
Input "mes número"; M
input "día"; D
input "latitud"; fi
input "radiacion maxima total"; Gmax
input "hora de inicio de operación"; HLL
input "escoger opcion"; tp
if M=1 then DT=D
if M=2 then DT=31+D
if M=3 then DT=59+D
if M=4 then DT=90+D
```

```

if M=5 then DT=120+D
if M=6 then DT=151+D
if M=7 then DT=181+D
if M=8 then DT=212+D
if M=9 then DT=243+D
if M=10 then DT=273+D
if M=11 then DT=304+D
if M=12 then DT=334+D
pi=3.141592567
cls

```

```

'-----declinacion, longitud dia solar, sunrise, sunset-----
'

```

```

DT1=DT+1
D1=D+1
for i=HLL to HLL+24 step 0.25
if i>24 then DT=DT1
if i>24 then D=D1
20 locate 3,2 : Print " mes ", " Dia ", " Días transcurridos "
locate 4,2 : print spc(2) M spc(10) D spc (15) Dt
delta=23.45*sin(2*pi*(284+DT)/365)
print
cosws=-tan(fi*pi/180)*tan(delta*pi/180)
tanws=((1/cosws)^2-1)^0.5
if cosws<0 then ws=abs(atn(tanws)*180/pi-180) else ws=atn(tanws)*180
print
longday=(2/15)*ws
sunrise=12-longday/2
sunset=12+longday/2
print "declinacion", " longday", " sunrise", " sunset"
print using "###.###"; delta, spc(10) longday, spc(9) sunrise, spc(10)

```

```

'-----calculo radiacion solar directa, difusa, total-----

```

```

if i<24 then t=i-12 else t=(i-24)-12
Gaux=cos((180*t/longday)*(pi/180))
if Gaux>0 then
G=Gmax*(Gaux^1.2)
else
G=0
end if
locate 10,5 : print using "###.###"; i : locate 10,14 : print using "
write #1, i, G
NEXT i

```

'-----calculo temperatura ambiente-----'

```

print
print
Input "Tmin"; Tmin
Input "Tmax"; Tmax
T1=3+longday/2
T2=48-T1
A=(Tmax-Tmin)/2
B=(Tmax+Tmin)/2
fin=24+HLL
for h1=sunrise-1 to 13.75 step .25
time1=-T1/4+(h1-sunrise+1)/(14-sunrise+1)*(T1/2)
Temp=A*sin(2*(pi/T1)*time1)+B
write #2, h1, Temp
next h1
close
OPEN "TAMBIENT.dat" FOR APPEND AS #1
for h1=13.75 to fin step .25
time2=T2/4+(h1-14)/(24+sunrise-1-14)*T2/2
Temp=A*sin(2*(pi/T2)*time2)+B
write #1, h1, Temp
next h1
close #1
end

```

Programa para calcular la producción

```

cls
' PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA PRODUCCION EN DESTILADORES
SOLARES
' SOMEROS DEPENDIENDO DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.
ag=0.05
aw=0.27
ab=0.48
mg=0.005*2700
mb=8.1
cg=820
cw=4190
cb=820
Uwb=30
Uba=2
PRINT "DATOS DE INICIO"

```

```

INPUT "Temp. inicial agua"; Tw
INPUT "Temp. inicial fondo"; Tb
INPUT "Temp. inicial cubierta"; Tg
INPUT "Masa de agua inicial"; Mwi
INPUT "Hora de llenado del destilador"; HLL
locate 10, 5 : print "Tipo de operación"
print "1 = continua"
print "2 = batch"
input "presione 1 ó 2 para escoger operación"; tp
aux=0
Mw=Mwi
OPEN "tambient.dat" FOR INPUT AS #1
OPEN "radsolar.dat" FOR INPUT AS #2
OPEN "viento.txt" FOR INPUT AS #3
OPEN "TEMPDEST.DAT" FOR OUTPUT AS #4
While not eof(1)
INPUT #1, h1, Ta
if h1<HLL then goto 100
INPUT #2, tiemp, G
INPUT #3, Vv

```

'-----calculo de Uwg-----'

```

TMP=Tw
DT=Tw-Tg
IF TMP<25 OR (TMP=25 AND DT<1) THEN
Uwg=0
ELSE
IF TMP>=25 AND TMP<=50 THEN
Uaux1=-5.24272+5.29481*DT
T1=25
Uaux2=17.0663+14.2622*DT
T2=50
ELSE
IF TMP>=50 AND TMP<=60 THEN
Uaux1=17.0663+14.2622*DT
T1=50
Uaux2=24.9137+22.9621*DT
T2=60
ELSE
IF TMP>=60 AND TMP<= 70 THEN
Uaux1=24.9137+22.9621*DT
T1=60
Uaux2=42.2959+37.3881*DT
T2=70
ELSE

```

```
IF TMP<=70 and TMP<=80 THEN
Uaux1=42.2959+37.3881*DT
T1=70
Uaux2=94.123+55.1987*DT
T2=80
ELSE
Uaux1=94.123+55.1987*DT
Uaux2=94.123+55.1987*DT
T1=80
T2=80
END IF
END IF
END IF
END IF
DT=T2-T1
DU=Uaux2-Uaux1
DX=TMP-T1
Uwg=(Dx*DU)/DT
Q=Uaux1+Uwg
END IF
IF Q<=0 THEN
Uwgcalc=0 : Q=0
Else
DT=Tw-Tg
Uwgcalc=Q/DT
END IF
-----
Uwg=Uwgcalc
Uga=2.8+3*Vv
goto 60
TwK=Tw+273.15
TgK=Tg+273.15
TBK=Tb+273.15
5 IF Q<=0 THEN
Mcalc=0
ELSE
IF tp=1 THEN GOTO 10
IF tp=2 THEN GOTO 30
10 IF tiemp-HLL>=0 and tiemp-HLL<.2 then
Tw=(Q/((Mwi-Mw)*cw))+Ta
Mw=Mwi
TMD=(Tg+Tw)/2
hfg=2503-(0.00514*TMD^2)-2.1*TMD
Mcalc=Q*900/hfg
```

```

Mcalc=Mcalc/1000
Mw=Mw-Mcalc
ELSE
TMD=(Tg+Tw)/2
hfg=2503-(0.00514*TMD^2)-2.1*TMD
Mcalc=Q*900/hfg
Mcalc=Mcalc/1000
Mw=Mw-Mcalc
END IF
GOTO 50
30 IF Tiemp-HLL>=0 and Tiemp-HLL<0.2 THEN
Tw=Ta
Mw=Mwi
TMD=(Tg+Tw)/2
hfg=2503-(0.00514*TMD^2)-2.1*TMD
Mcalc=q*900/hfg
Mcalc=Mcalc/1000
Mw=Mw-Mcalc
ELSE
TMD=(Tg+Tw)/2
hfg=2503-(0.00514*TMD^2)-2.1*TMD
Mcalc=Q*900/hfg
Mcalc=Mcalc/1000
Mw=Mw-Mcalc
END IF
GOTO 50
50 END IF
Mcalc=Mcalc*1000
acumul=Mcalc+aux
aux=acumul
GOTO 70

```

60 ' temperatura de la charola

```

ITERAC=10
i=1
T=TB
MC=Mb*Cb
Do Until i>ITERAC
yo=T
m0=(ab*G)+(Uwb*(Tw-yo))-(Uba*(yo-Ta))
m0=m0/MC
yo=T+(m0*90/2)
m1=(ab*G)+(Uwb*(Tw-yo))-(Uba*(yo-Ta))
m1=m1/MC
yo=T+(m1*90/2)

```

```

m2=(ab*G)+(Uwb*(Tw-yo))-(Uba*(yo-Ta))
m2=m2/MC
yo=T+(m2*90)
m3=(ab*G)+(Uwb*(Tw-yo))-(Uba*(yo-Ta))
m3=m3/MC
fi=(m0+(2*m1)+(2*m2)+m3)/6
T=T+(fi*90)
i=i+1
Loop
Tb=T

```

' temperatura del agua del mar

```

i=1
T=Tw
MC=Mw*Cw
Do until i>ITERAC
yo=T
m0=(aw*G)-(Uwg*(yo-Tg))-(Uwb*(yo-Tb))
m0=m0/MC
yo=T+(m0*90/2)
m1=(aw*G)-(Uwg*(yo-Tg))-(Uwb*(yo-Tb))
m1=m1/MC
yo=T+(m1*90/2)
m2=(aw*G)-(Uwg*(yo-Tg))-(Ywb*(yo-Tb))
m2=m2/MC
yo=T+(m2*90)
m3=(aw*G)-(Uwg*(yo-Tg))-(Uwb*(yo-Tb))
m3=m3/MC
fi=(m0+(2*m1)+(2*m2)+m3)/6
T=T+(fi*90)
i=i+1
Loop
Tw=T

```

' calculo de la temperatura del vidrio

```

i=1
T=Tg
MC=Mg*Cg
Do Until i>ITERAC
yo=T
m0=(ag*G)+(Uwg*(Tw-yo))-(Uga*(yo-Ta))
m0=m0/MC
yo=T+(m0*90/2)

```

```

m1=(ag*G)+(Uwg*(Tw-yo))-(Uga*(yo-Ta))
m1=m1/MC
yo=T+(m1*90/2)
m2=(ag*G)+(Uwg*(Tw-yo))-(Uwg*(yo-Ta))
m2=m2/MC
yo=T+(m2*90)
m3=(ag*G)+(Uwg*(Tw-yo))-(Uwg*(yo-Ta))
m3=m3/MC
fi=(m0+(2*m1)+(2*m2)+m3)/6
T=T+(fi*90)
i=i+1
Loop
Tg=T
GOTO 5
70 cls
Locate 5,1 : print "hora" : locate 5, 7 : print "radiacion"
locate 5,18 : print "Tw" : locate 5,25 : print "Tb" : locate 5,31 :
locate 6,1 : print using "##.##"; tiempo: locate 6,10 : print using "
delay .2
WRITE #4, tiempo, Tw, Tb, Tg, Mw, Mcalc, acumul
100 cls : locate 10, 5 : print "comparando datos espere porfavor",
wend
close

```

Resultados del programa.

A continuación se muestra los resultados utilizando el programa para el día 21 de junio.

Primeramente se muestra los gráficos de la radiación solar y temperatura ambiente calculados por el programa, así como también un gráfico de velocidad de viento, estos datos de velocidad de viento se cargaron al programa desde un archivo externo.

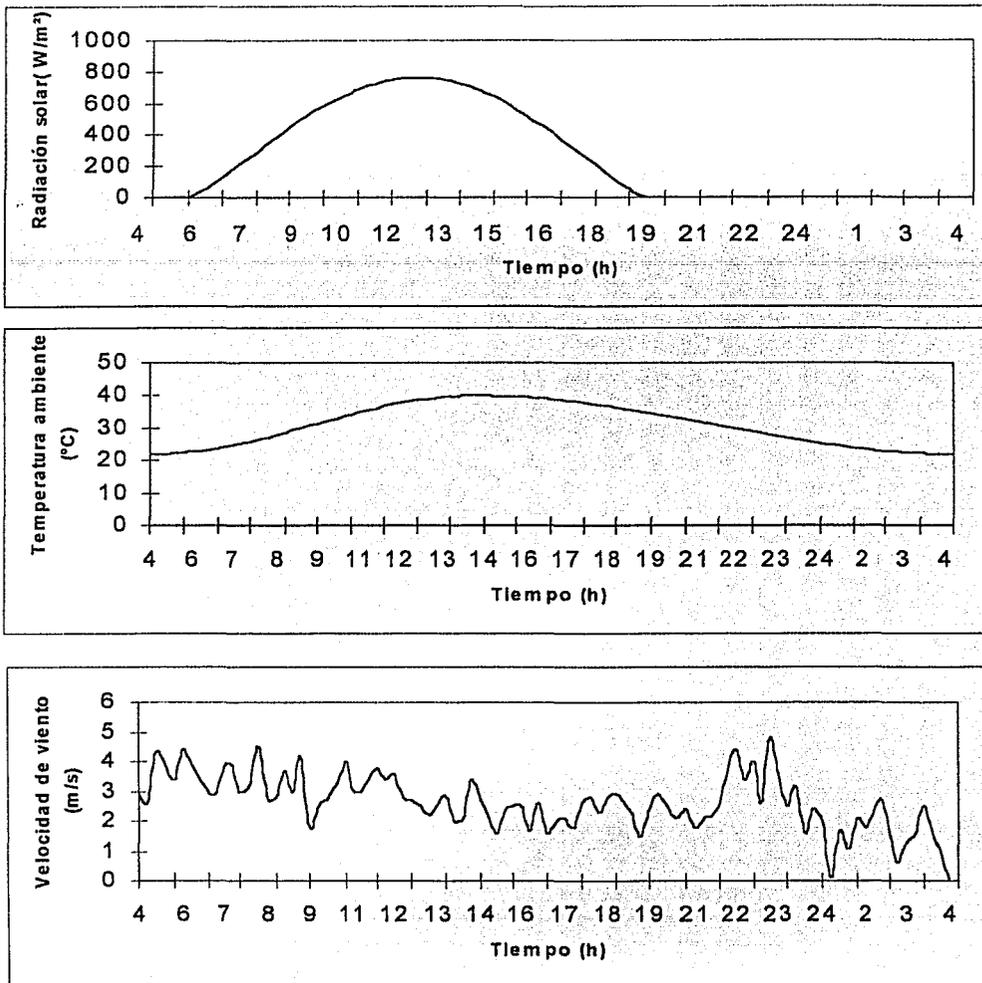


Figura A1.1 Gráficas de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento.

En la figura A1.2 se observan las diferencias que existen en la producción total por consecuencia de la hora de carga de salmuera.

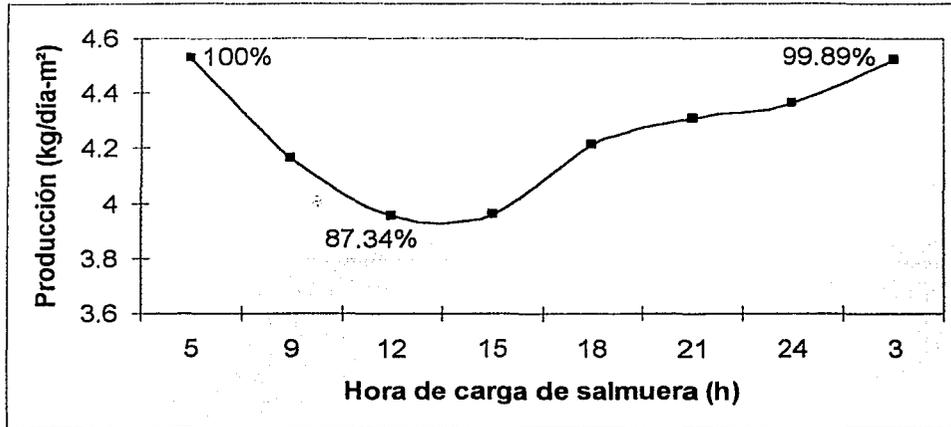


Figura A1.2 Variaciones en la producción por efecto de la hora de recarga de salmuera.

Claramente se ve que la peor condición de operación es cuando se carga el destilador al medio día, la producción alcanzada en 24 horas es apenas el 87.34% de la máxima producción que se obtiene cuando se carga el destilador a las 5 de la mañana.

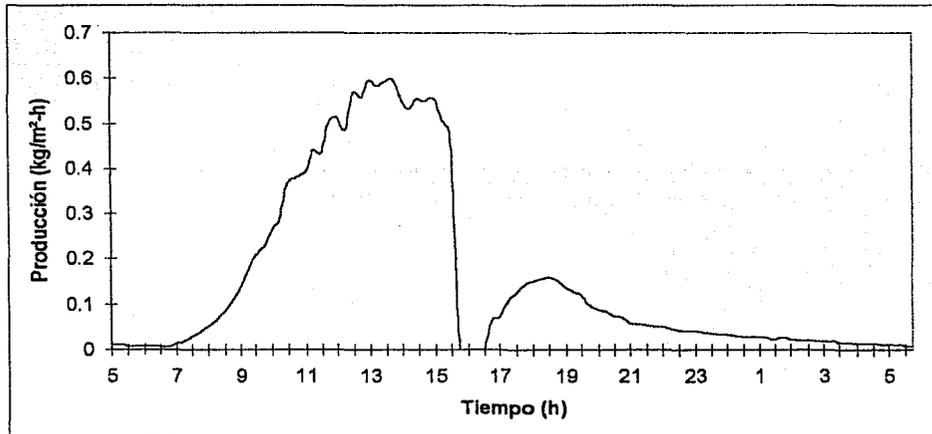


Figura A1.3 Caída de la producción cuando se recarga el destilador a las 15 horas.

En la figura A1.3 se muestra la caída que sufre la producción a la hora de la recarga, en esta figura la recarga se efectuó a las 15 horas.

Por lo tanto es claro que la operación de recarga del destilador es una operación crítica ya que esto se refleja directamente en el buen funcionamiento del destilador. Para el caso de una planta de destilación solar se pueden desarrollar sistemas automáticos que realicen esta operación.

ANEXO II

Definiciones

A fin de entender los términos empleados en este trabajo a continuación se describen algunos de ellos.

Radiación directa, la radiación solar recibida sin que haya sido dispersada por la atmósfera.

Radiación difusa, la radiación solar recibida después de que su dirección ha sido modificada por la atmósfera.

Radiación solar total, la suma de la radiación solar directa y difusa sobre una superficie, también se conoce como radiación global.

Irradiancia, W/m^2 la razón a la cual la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área de la superficie. Se utiliza el símbolo G para irradiancia solar con su respectivo subíndice según el tipo de radiación (directa, difusa o espectral).

Irradiación o exposición radiante, J/m^2 la energía incidente por unidad de área sobre una superficie, se encuentra integrando la irradiancia sobre un intervalo de tiempo especificado, usualmente una hora o un día.

Insolación, es un término utilizado únicamente para designar la radiación solar.

Radiosidad, W/m^2 la razón a la cual la energía radiante deja una superficie, por unidad de área, por combinación de emisión, reflexión y transmisión.

Potencia emitiva, W/m^2 la razón a la cual la energía radiante deja una superficie por unidad de área, únicamente por emisión.

Tiempo solar, el tiempo basado en el movimiento aparente del Sol a través del cielo. El medio día solar se denota cuando el Sol atraviesa el meridiano del observador. La diferencia en minutos entre la hora solar y la hora estándar es:

$$\text{Hora solar} - \text{hora estándar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E \quad (\text{AII.1})$$

donde L_{st} es el meridiano estándar para la hora local de la zona, L_{loc} es la longitud de la localización en cuestión y está en grados oeste, $0^\circ < L < 360^\circ$, E es la ecuación de tiempo en minutos y está determinada por la ecuación:

$$E = 229.2(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\sen B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\sen 2B) \quad (\text{AII.2})$$

Ángulos Sol-Tierra.

Las relaciones geométricas entre un plano con cualquier orientación particular relativa a la tierra en algún instante y la radiación directa que llega, es decir, la relación relativa del Sol al plano, se puede describir en función de varios ángulos. Estos ángulos son los siguientes:

ϕ **Latitud**, la localización angular norte o sur del ecuador, norte positiva; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

δ **Declinación**, la posición angular del sol al medio día solar con respecto al plano del ecuador, norte positivo; $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$, la declinación se puede calcular con la ecuación de Cooper (1969).

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (\text{AII.3})$$

β **Pendiente**, el ángulo entre el plano de la superficie en cuestión y la horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$.

γ **Ángulo azimuth superficie**, es el ángulo en el plano horizontal, entre la línea debida al sur y la proyección de la normal a la superficie en el plano horizontal, con cero hacia el Sur, negativo hacia el Este, y positivo al Oeste.

ω **Ángulo hora**, el desplazamiento angular del Sol Este u Oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje a 15° por minuto, negativo por las mañanas y positivo por las tardes.

θ **Ángulo de incidencia**, el ángulo entre la radiación directa sobre una superficie y la normal a la superficie.

θ_z **Ángulo cenit**, el ángulo entre la vertical y la línea al Sol.

α_s **Ángulo de altitud solar**, el ángulo entre la horizontal y la línea a el Sol.

γ_s **Ángulo azimuth solar**, el desplazamiento angular del sur de la proyección de la radiación directa sobre el plano horizontal. Desplazamientos Este del Sur son negativos, desplazamientos Oeste del sur son positivos.

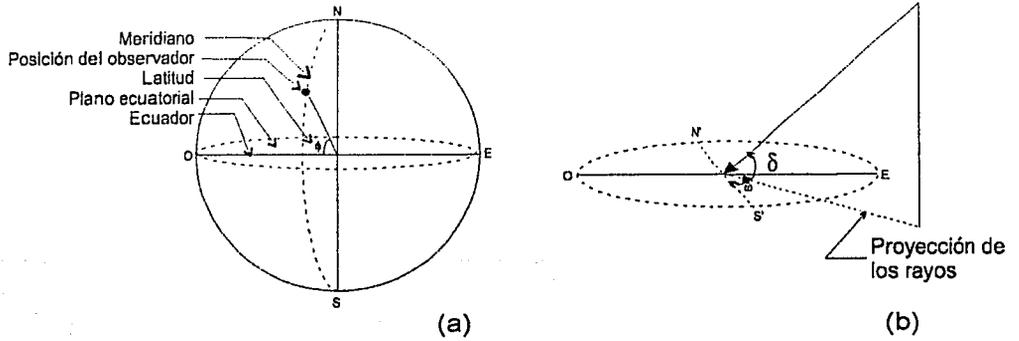


Figura AII.1 (a) y (b) vista de los diferentes ángulos.

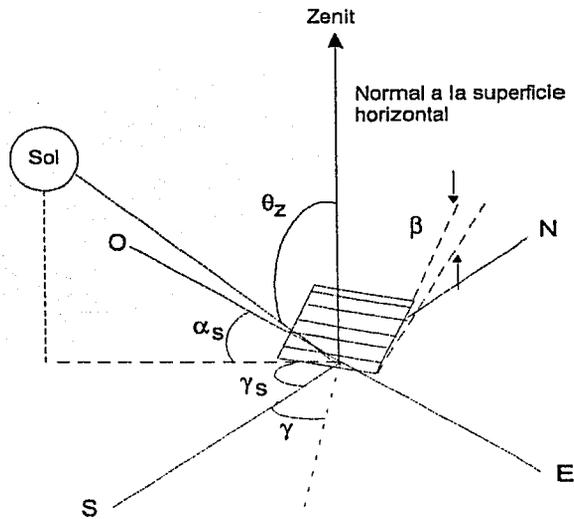


Figura AII.2. Diferentes ángulos solares y para una superficie inclinada