



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR
EN UN CONCENTRADOR SOLAR

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

F Í S I C O

P R E S E N T A:

P A M E L A V I L L A M I L S A P I É N

DIRECTOR DE TESIS: DR. GERARDO RUÍZ CHAVARRÍA



2011



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.

1. Datos del alumno:

Villamil
Sapién
Pamela
55 49 64 00
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
401110445

2. Datos del tutor:

Dr.
Gerardo
Ruíz
Chavarría

3. Datos del sinodal 1:

Dr.
Gerardo Jorge
Vázquez
Fonseca

4. Datos del sinodal 2:

Dr.
José Roberto
Zenit
Camacho

5. Datos del sinodal 3:

Dr.
Eduardo
Rincón
Mejía

6. Datos del sinodal 4:

Dr.
Francisco Javier
Solorio
Ordaz

7. Datos del trabajo escrito:

Procesos de transferencia de calor en un concentrador solar
75 páginas
2011

Índice general

1. Energía capturada por un colector solar	3
1.1. Radiación solar	3
1.2. Componentes de la radiación solar	10
1.3. Ángulos solares	11
1.4. Radiación solar en México	12
1.5. Colectores solares	13
1.6. Superficies selectivas para colectores solares	16
1.7. Descripción del dispositivo	18
1.8. Descripción del diseño de la curva del colector solar prototipo	20
1.9. Determinación de las dimensiones del área de abertura del colector	25
1.10. Trayectoria de rayos para un colector de óptica anidólica	32
1.11. Disminución de pérdidas por convección	34
2. Balances energéticos en el absorbedor	37
2.1. Pérdidas de energía por transferencias de calor	37
2.2. Estado estacionario por el balance de pérdidas de energía por transferencia de calor y energía proporcionada por el Sol	44
2.3. Medición de la curva de saturación del agua	46
2.4. Simulación numérica de calentamiento de agua	50
3. Dispositivo experimental	55
3.1. Principio de operación de transductores piezoeléctricos	55
3.2. Medición de temperatura mediante termopares y sondas de platino	58
3.2.1. Termopares	58
3.2.2. Sondass de platino	58
3.3. Calibración de transductores de presión y temperatura	63
3.4. Características de sistemas de conversión analógico-digital	65
3.5. Programación de tarjetas de adquisición y acondicionamiento de señales	67
Bibliografía	74

Capítulo 1

Energía capturada por un colector solar

En una escala humana el Sol es una fuente inagotable de luz y calor que podemos considerar como un gigantesco reactor de fusión nuclear constituido por diferentes gases estratificados. La energía en forma de radiación electromagnética, resultado de las reacciones de fusión que tienen lugar en él, es transferida a la superficie desde donde es radiada al espacio. En este proceso de transferencia aparecen fenómenos convectivos y de radiación dando lugar a un espectro continuo de emisión.

1.1. Radiación solar

Debido a la compleja estructura del Sol, para la aplicación de dispositivos que aprovechan la energía solar es posible adoptar un modelo conocido: el modelo de *Cuerpo Negro*. Para estos fines, el Sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, con un diámetro de 1.39×10^6 km, situado a la distancia media de 1.5×10^8 km de la Tierra. Se estima que la temperatura en el interior del Sol debe de ser del orden de 10^7 K, pero en la fotosfera, es decir, en la superficie externa del Sol, se ha estimado que la *Temperatura Efectiva* es de 5 785 K.

Se conoce como *Radiación* al proceso físico por medio del cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz y no requieren de ningún medio para su propagación.

La luz es una energía radiante que nuestros sentidos pueden percibir directamente. Sin embargo, hay diferentes manifestaciones de la radiación, dependiendo de la longitud de onda de esta. Convencionalmente, el espectro de energía radiante se divide en varias regiones, como se muestra en el cuadro 1.1.

El Sol emite radiación en el espectro electromagnético desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Sin embargo, para los fines de aprovechamiento de su energía, sólo es importante la llamada radiación térmica que incluye la ultravioleta (*UV*), la radiación visible (*VIS*) y la infrarroja (*IR*).

Denominación	Límites de longitud de onda (m)
Rayos x	$10^{-12} - 10^{-8}$
Ultravioleta lejano	$10^{-8} - 2.0 \times 10^{-7}$
Ultravioleta cercano	$2.0 \times 10^{-7} - 4.0 \times 10^{-7}$
Visible	$4.0 \times 10^{-7} - 7.5 \times 10^{-7}$
Infrarrojo cercano	$7.5 \times 10^{-7} - 2.5 \times 10^{-6}$
Infrarrojo medio	$2.5 \times 10^{-6} - 5.0 \times 10^{-5}$
Infrarrojo lejano	$5.0 \times 10^{-5} - 1.3 \times 10^{-3}$
Microondas	$1.3 \times 10^{-3} - 1.0$

Cuadro 1.1: Espectro de energía radiante dividido en regiones [McVeigh, 1977].

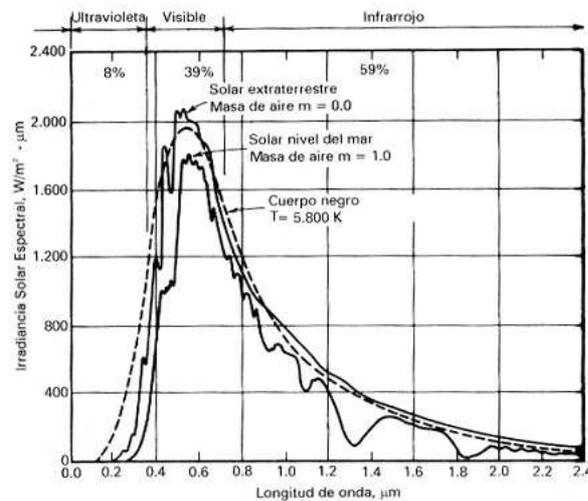


Figura 1.1: Irradiancia espectral del Sol y de un cuerpo negro. La línea continua corresponde a la irradiancia medida a tope de la atmósfera (extraterrestre); la curva punteada representa a la irradiación de un cuerpo negro a 5 785 K y la curva con variaciones pronunciada corresponde a la irradiancia en superficie [McVeigh, 1977].

Todos los cuerpos emiten cierta cantidad de radiación en función de su temperatura. A mayor temperatura ocurren dos cambios en la radiación emitida:

- La intensidad de la emisión es mayor y
- El color o tipo de radiación cambia hacia una menor longitud de onda, esto es, del *IR* al *VIS* y al *UV*.

En la figura 1.1 se muestra tanto la distribución espectral de un cuerpo negro en función de la longitud de onda como las distribuciones de la radiación solar que llegan a tope de la atmósfera y a la superficie planetaria.

La cantidad total de energía solar que llega a una localidad específica de la Tierra depende de cuatro factores principales: *Emisión de radiación solar*, la *Distancia entre el Sol y la Tierra*, la *Altitud del sol* y la *Longitud del día*.

1. Emisión de radiación solar.- La energía total que emite el Sol es la suma de las energías $E_\lambda(\lambda)$, emitidas a diferentes longitudes de onda, λ :

$$\sum_{\Delta\lambda} E_\lambda(\lambda)\Delta\lambda \quad (1.1)$$

en donde E_λ es el poder emisivo espectral dado por la ley de Planck, para un cuerpo negro a cualquier longitud de onda, λ , y temperatura, T :

$$E_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (1.2)$$

en donde $C_1 = 2\pi hc^2$ y $C_2 = hc/k$. Tomando $\Delta\lambda \rightarrow 0$ la energía total es:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1 d\lambda}{\lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (1.3)$$

a partir de el siguiente cambio de variable: $x = \frac{C_2}{\lambda T}$ la ecuación (1.3) queda expresada como:

$$E = \frac{-C_1 T^4}{C_2^4} \int_{x(0)}^{x(\infty)} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (1.4)$$

al evaluar numéricamente la integral y sustituir los valores de las constantes $C_1 = 3.7470 \times 10^{-16} \text{ Wm}^2$, $C_2 = 1.4397 \times 10^{-2} \text{ mK}$ llegamos a que $E = 5.669 \times 10^{-8} T^4$.

En donde podemos asignar a $\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (la constante de Stefan-Boltzman). Como un cuerpo negro, el Sol emite radiación electromagnética de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzman, con el valor de la temperatura 5785 K se tiene que la potencia por metro cuadrado emitida por el Sol es la energía total emitida por un cuerpo negro, la cual presenta un valor de $6.35 \times 10^7 \text{ W/m}^2$.

A partir del valor de la energía y el radio medio del Sol R_s ($6.959 \times 10^8 \text{ m}$), obtenemos el área $A = 4\pi R_s^2 = 6.1 \times 10^{18} \text{ m}^2$, siendo así la potencia emitida por el Sol de $3.873 \times 10^{26} \text{ W}$.

Para conocer la longitud de onda a la que se da una mayor intensidad de radiación en el espectro de emisión de un cuerpo negro, es necesario obtener el máximo de la ecuación (1.2) esta condición se expresa como:

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \right] = 0 \quad (1.5)$$

de donde:

$$\int C_1 - \frac{\lambda^5 \left[\frac{C_2}{T} \left(\frac{-1}{\lambda^2} \right) e^{C_2/\lambda T} \right] + (e^{C_2/\lambda T} - 1) 5\lambda^4}{\lambda^{10} [e^{C_2/\lambda T} - 1]^2} = 0 \quad (1.6)$$

y por lo tanto:

$$-\left[\lambda^5 \frac{C_2}{T} \left(\frac{-1}{\lambda^2}\right) e^{C_2/\lambda T} + 5\lambda^4 (e^{C_2/\lambda T} - 1)\right] = 0 \quad (1.7)$$

Simplificando la ecuación (1.7), se obtiene que:

$$\frac{C_2}{T} e^{C_2/\lambda T} - 5e^{C_2/\lambda T} + 5 = 0 \quad (1.8)$$

si $x = \frac{C_2}{\lambda T}$, al reducir la ecuación (1.8)

$$\frac{x}{1 - e^{-x}} - 5 = 0 \quad (1.9)$$

Al resolver la ecuación (1.9) por el método de Newton, se obtiene que $x = 4.9651$. En la figura 1.1 podemos observar la irradiancia medida en el tope superior de la atmósfera terrestre (valor promedio de la radiación solar), de acuerdo a la ley de desplazamiento de Wien, la longitud de onda de la emisión de radiación máxima, λ_{max} , es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo radiante:

$$(\lambda T)_{max} = 0.002897(mK) \quad (1.10)$$

A la temperatura de 5 785 K, la longitud de onda correspondiente a la máxima radiación solar será aproximadamente igual a los 500 nm (entre el azul y verde).

Cuando la radiación alcanza un cuerpo, pueden producirse 3 fenómenos: *reflexión*, *absorción* y *transmisión*.

La fracción de energía que se refleja se denomina *reflectancia* o *albedo*, (ρ), la fracción de energía que se absorbe se denomina *absortancia*, (α), y la transmitida, *transmitancia*, (τ).

Los valores de ρ , τ y α varían en función del tipo de material que se trate y en función de la longitud de onda [Duffie Beckman, 1974].

2. Distancia entre el Sol y la Tierra.- El movimiento de la Tierra alrededor del Sol describe una órbita elíptica, con éste en uno de sus focos, con lo que se tiene un cambio continuo en la distancia entre ambos, haciendo que el flujo de radiación solar que incide sobre la Tierra también varíe a lo largo de la órbita de traslación. Nuestro planeta también tiene un movimiento de rotación alrededor de su eje polar; debido a la inclinación de este último y el movimiento orbital, la duración del día y de la noche varían según la latitud del lugar y la posición de la Tierra en su órbita alrededor del Sol.

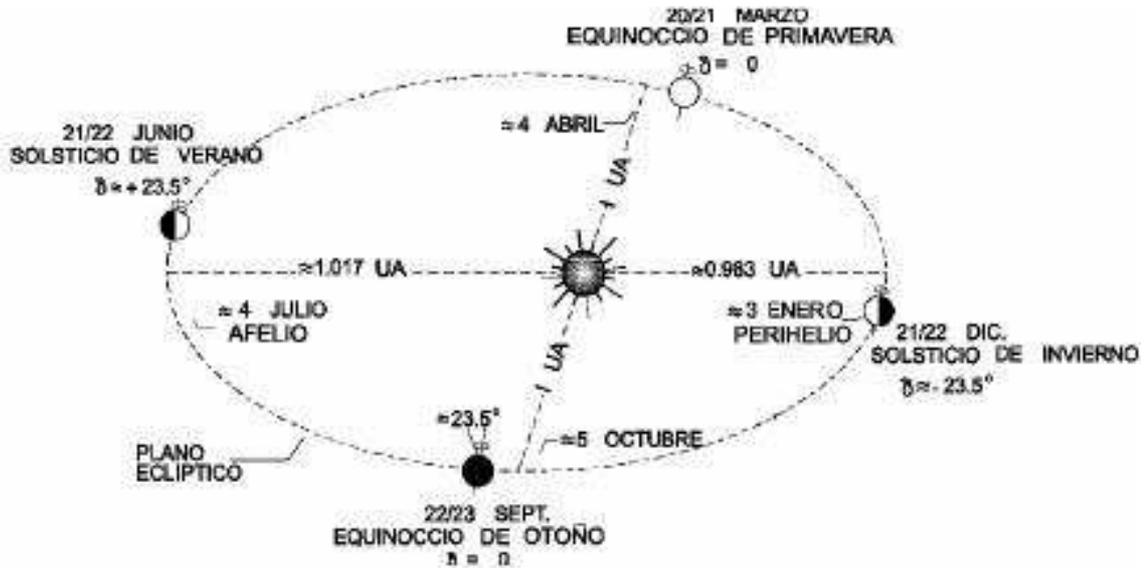


Figura 1.2: Movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol. El sol se encuentra en uno de los focos de la órbita elíptica de la tierra [Iqbal, 1983].

Las dos cantidades físicas que determinan la magnitud de la radiación solar son: a) el *Ángulo de inclinación solar* y b) la *Excentricidad de la órbita terrestre*.

- a) El ángulo de inclinación solar, δ , es el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que une el centro del Sol con el de la Tierra; sus variaciones estacionales permiten que se tengan regiones que puedan recibir una gran cantidad de radiación solar en ciertas épocas (verano) o prácticamente nada en otras (invierno).



Figura 1.3: Variación del ángulo de inclinación solar a lo largo del año, mostrando los equinoccios de primavera y otoño y los solsticios de verano e invierno [Iqbal, 1983].

La Tierra, al girar sobre su propio eje, forma el ángulo de inclinación terrestre, con la normal al plano eclíptico, cuyo valor es de $23^\circ 26' 59''$. Por una parte, el

movimiento de rotación terrestre da lugar a los cambios diarios en la recepción de la radiación solar, mientras que el movimiento de la traslación terrestre da los cambios estacionales. Durante el movimiento diario se puede considerar constante el ángulo de inclinación solar, sin embargo, conforme la Tierra se traslada alrededor del Sol, el ángulo irá cambiando, como se muestra en la figura 1.3.

El ángulo de máxima declinación que se da en el hemisferio norte entre el rayo solar y el ecuador es de $+23^{\circ} 27'$ y se presenta el 21 de junio; a esta fecha se le llama solsticio de verano, mientras que a la latitud geográfica en donde los rayos inciden normales a la superficie se le conoce como trópico de Cáncer. En cuanto al ángulo máximo que se da en el hemisferio sur entre el rayo solar y el ecuador es de $-23^{\circ} 27'$ y se presenta el 21 de diciembre, fecha denominada solsticio de invierno, mientras que la latitud geográfica en donde los rayos inciden normales a la superficie se le conoce como trópico de Capricornio. Existen dos momentos en los cuales los rayos inciden perpendicularmente sobre el ecuador (inclinación = 0); el primero se da el 21 de marzo y se conoce como equinoccio de primavera, el segundo se presenta el 23 de septiembre y se conoce como equinoccio de otoño.

- b) La excentricidad de la órbita de traslación de la Tierra alrededor del Sol es de 0.0164, por lo que se recibirá una cantidad variable de radiación a lo largo del año, es decir, durante el verano del hemisferio norte, la Tierra se encuentra en una posición más alejada del sol (afelio), a una distancia aproximada de 1.52×10^8 Km, por lo que recibe menos energía; por el contrario, durante el invierno del hemisferio norte, la Tierra estará en su posición más cercana al Sol (perihelio), a una distancia aproximada de 1.470568×10^8 Km, por lo que recibirá una mayor cantidad de radiación (figura 1.4). Como resultado de la excentricidad de la órbita, la Tierra recibe aproximadamente el 6% más de energía solar cuando se encuentra en el perihelio (noviembre, diciembre y enero) que cuando se localiza en el afelio (mayo, junio y julio).

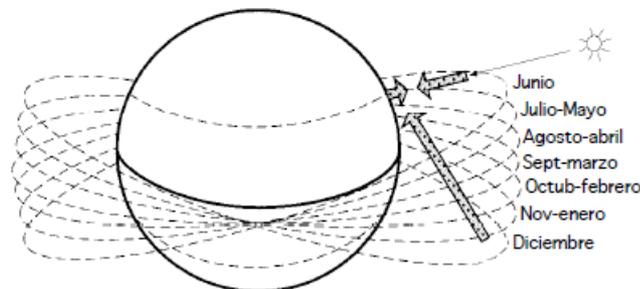


Figura 1.4: Posición del Sol a lo largo del año. El desplazamiento angular del Sol, hacia el este u oeste del meridiano local, se debe a la rotación de la Tierra sobre su eje, a razón de 15° por hora.

3. La altitud del Sol.- El ángulo entre los rayos solares y el plano tangente a la superficie

terrestre, también tiene un efecto importante en la distribución de la radiación solar incidente en la Tierra. Mientras mayor sea la altitud del Sol (entre más se acerquen a la perpendicular los rayos), mayor será la radiación recibida por unidad de área sobre la Tierra. Como se puede apreciar en la figura 1.5, la variación horaria de la altitud del Sol, tiene un amplio rango durante el día, lo cual obviamente regulará la cantidad de radiación que cae en una determinada región geográfica.

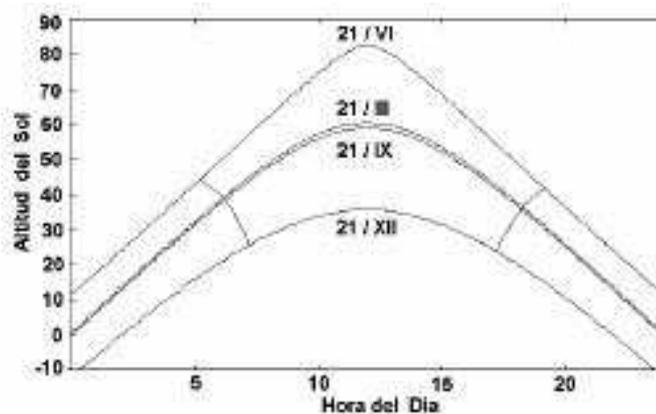


Figura 1.5: Variación horaria del ángulo de la altitud del Sol determinado para la ciudad de Ensenada, Baja California (Lat:31). Cada curva corresponde al día en que se inicia la correspondiente estación, indica en la parte superior. Las pequeñas curvas indican la hora en que sale y se mete el sol, por ejemplo: el día 21/XII, el sol sale a las 7:00 y se mete a las 17:00 [Almanza y López 1975].

4. Longitud del día es el tiempo que está expuesta la faz de la tierra a la radiación solar, afectando la cantidad de energía solar que recibe. En el ecuador, por ejemplo, la longitud del día es del orden de 12 horas a lo largo del año, mientras que en los polos varía de 0 horas en invierno a 24 horas en verano.

La combinación de estos factores (la emisión de radiación, el ángulo de inclinación solar, la excentricidad de la órbita de traslación terrestre, la altitud del Sol y la longitud del día) produce el patrón de radiación solar (o insolación), recibido en el tope de la atmósfera, mostrado a continuación.

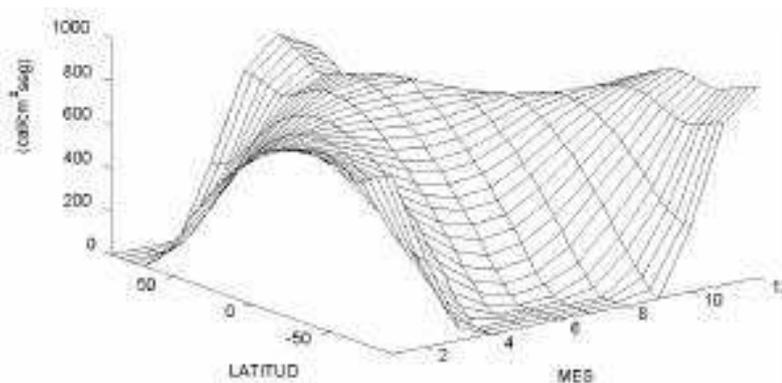


Figura 1.6: Variación de la insolación para toda la Tierra, en el tope de la atmósfera, en función de la latitud y el mes del año. Se puede notar las grandes cantidades de radiación solar recibida en los polos durante los correspondientes veranos, cuando la duración del día es de 24 horas [Barry y Chorley, 1982].

1.2. Componentes de la radiación solar

La radiación emitida por el Sol, y las condiciones geométricas respecto del sistema Sol-Tierra dan por resultado que sobre la atmósfera terrestre incida una cantidad de radiación solar casi constante, es decir, la cantidad de energía que incide en un área fuera de la atmósfera, en un instante determinado, donde el área es perpendicular a la dirección de propagación de la luz, se puede establecer una *Constante solar* (G_o). Se han efectuado muchas estimaciones de esta constante, y el valor más aceptado es $1353 \text{ W/m}^2 = 1.940 \text{ cal/cm}^2 \text{ min} = 428 \text{ Btu/ft}^2\text{hr}$.

La radiación solar se ve alterada notablemente al pasar a través de la atmósfera, ya que parte de la irradiancia solar es atenuada por dispersión, por esparcimiento y otra parte por absorción¹. La radiación que es dispersada y esparcida por la atmósfera se conoce como *radiación difusa*. La radiación que llega a la superficie de la Tierra sin haber sufrido cambios en la dirección Sol-Observador se llama *radiación directa*. A partir de la suma de estas radiaciones se puede conocer la *radiación global* que incide sobre una superficie horizontal.

También podemos expresar la potencia solar (y en general de cualquier radiación) con el término irradiancia, siendo esta la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área (W/m^2).

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no sólo de la irradiancia que exista, sino también de la orientación y geometría que tenga la superficie en cuestión respecto a la dirección de propagación de un haz de radiación. La irradiancia será máxima cuando el plano esté en posición normal a la dirección de propagación de la radiación y mínima si es paralelo. Por lo tanto, la irradiancia sobre una superficie dependerá del ángulo de incidencia que tenga la superficie respecto a la dirección de propagación de la radiación.

¹Absorbida por agua, ozono y partículas suspendidas; reflejada por las nubes y por la superficie terrestre y retroesparcida por el aire.

Cuando incide la radiación sobre un plano, durante un tiempo determinado, puede hablarse entonces de que incidió una cierta cantidad de energía. La cantidad de energía por unidad de área que incide en un determinado período, recibe el nombre de irradiación (J/m^2) que no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante un período en cuestión.

1.3. Ángulos solares

El flujo de la energía que incide sobre una superficie dependerá de las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación particular, relativo a la Tierra, y el tiempo de la llegada del haz de radiación solar, es decir, la posición del Sol relativa al plano. Tal relación puede ser descrita en términos de varios ángulos, los cuales definiremos a continuación.

- El *ángulo azimutal* del Sol, β_s , es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal de la superficie desde el meridiano local. Con cero en el sur, negativo en el este y positivo en el oeste.
- El *ángulo cenital* del Sol o *ángulo de incidencia*, θ_0 , es la desviación que forma la radiación directa del Sol y la vertical del lugar, en un punto cualquiera de la Tierra. Este ángulo varía continuamente a lo largo del día y depende de la latitud del lugar y de la declinación (δ) del mismo.
- El *ángulo horario*, τ , es el desplazamiento angular del Sol (desde el este al oeste del meridiano local) respecto al mediodía, que es el instante cuando el Sol se encuentra más alto en el cielo, y se corresponde con un ángulo cenital solar mínimo ($\tau = 0$). Cada hora es igual a 15° de longitud, variando su signo (en las mañanas es negativo y en la tarde es positivo).
- La *latitud*, λ , de un lugar sobre la superficie de la Tierra, en su desplazamiento angular por encima o debajo del ecuador, medido desde el centro de la Tierra.

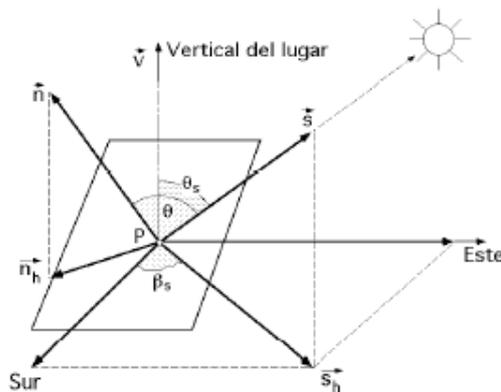


Figura 1.7: Situación espacial de diversos ángulos.

1.4. Radiación solar en México

Como ya definimos anteriormente la radiación solar es la energía que recibe la tierra cada día en fotones de luz que viajan por el espacio desde el sol. Por la gran distancia que existe entre la tierra y el sol, sólo una pequeña parte de radiación solar alcanza la superficie terrestre. Esto corresponde a una cantidad de energía del orden de 3.6×10^{18} MJ por año.

Pero no toda la radiación alcanza la superficie terrestre. El nivel de radiación solar sobre una superficie terrestre alcanza un total aproximadamente 1000 W/m^2 bajo buenas condiciones ambientales, a medio día y a nivel del mar.

Nuestro país recibe una cantidad inmensa de radiación solar; en casi el 40% de su extensión de aproximadamente 2 millones de kilómetros cuadrados, se tienen disponibles unos 21 MJ/m^2 al día.

La ciudad de México cuenta con una abundante insolación durante todo el año, siendo posible el uso masivo de recursos renovables para satisfacer las necesidades de la población. La potencia por unidad de área que llega a la superficie dependerá del día del año y de la hora, teniendo valores máximos de aproximadamente unos 800 W/m^2 .

Por ejemplo un día despejado en los días de mayor insolación, incide cerca de 1 kW térmico sobre cada metro cuadrado de superficie, sobre una azotea de 100 m^2 , se reciben aproximadamente 1980 MJ, es decir, 550 kW-hora cada día.

La industria utiliza kilowatts-hora como unidad de medida estándar para calcular la cantidad de energía eléctrica, consumida (o producida) por un aparato de 1 KW (1 000w) en una hora. Llamando a este cálculo también hora-pico (1.8).

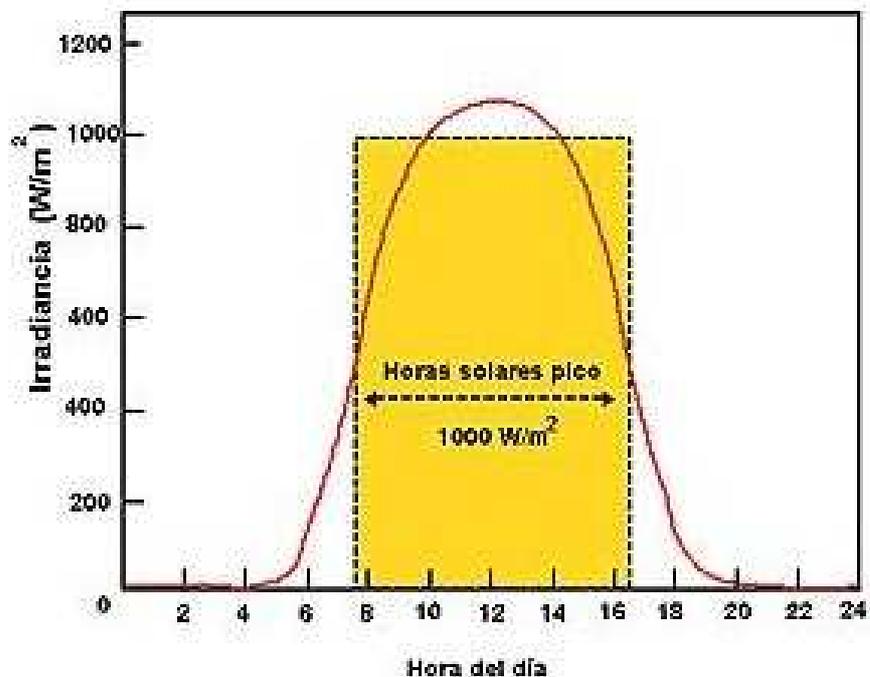


Figura 1.8: Irradiancia y horas solares pico (insolación) durante un día soleado.

El aprovechamiento de la energía solar estará condicionado inicialmente a la intensidad de radiación solar incidente sobre un área determinada, donde los efectos de la atmósfera son determinantes en dicha intensidad, dando como resultado una gran variabilidad de este parámetro con el tiempo y con la ubicación geográfica. La cantidad de energía disponible puede presentar diferencias importantes, no sólo de un día a otro, sino también de un año a otro. Por lo que es necesario contar con registros confiables de radiación solar, para emplearse en el diseño de equipos o sistemas que requieran el uso de energía solar. Debido a la situación arriba descrita, no existe una manera sencilla de predecir el valor de la irradiancia solar en un sitio o momento dado. Esto tiene implicaciones en el diseño de las instalaciones solares, las cuales se construyen para operar durante un gran número de años. Es muy importante poder estimar la energía disponible a lo largo de la vida útil del sistema, pero también su variabilidad. Por lo tanto, para poder conocer realmente el recurso solar disponible en un sitio, se requiere hacer mediciones sistemáticas de la radiación global a lo largo de un período de varios años. Esto se conoce como un año solar típico a partir del conocimiento de la climatología del parámetro mencionado.

Actualmente se disponen de tablas o de mapas de radiación solar, los cuales se elaboran a partir de mediciones vía satélite o de datos registrados. Entre los registros que miden las estaciones meteorológicas se cuenta con los valores de irradiancia solar o de irradiación. En general estos datos son presentados en periodos mensuales, estacionales y anuales. El método más común para obtener dichos registros es por medio de un piranómetro².

Los piranómetros utilizan diferentes tipos de sensores como son los termoeléctricos, fotoeléctricos, piroeléctricos o elementos bimetálicos. Sus propiedades en relación a su grado de precisión y confiabilidad son: sensibilidad, estabilidad, tiempo de respuesta, respuesta cosenoidal, respuesta azimutal, linealidad, respuesta de temperatura y respuesta espectral.

La información proporcionada por un piranómetro es registrada por método gráfico o electrónico, permitiendo así integrar los datos de irradiancias en periodos dados y así establecer la irradiación o insolación correspondiente.

1.5. Colectores solares

Un *colector solar* es un dispositivo que capta la radiación solar y la convierte en energía útil. Actualmente existen diversos colectores diseñados para la captación de energía solar; las diferencias radican en los materiales y en la geometría que se utilizan para su construcción, pero todos operan bajo el mismo principio.

Los colectores utilizan sistemas ópticos reflectores, y en algunos casos muy particulares refractores, para así poder aumentar la intensidad de la radiación solar que se dirige hacia una superficie receptora y otra que la concentra, siendo estas las partes fundamentales de los dispositivos.

El primero de los componentes refleja (o refracta) la radiación solar incidente sobre él, recibiendo solamente el flujo solar debido a su apertura, dirigiéndola hacia el concentrador, que la absorbe y transmite a un fluido térmico que circula por el colector.

Los concentradores pueden tener dos diferentes configuraciones: los primeros son los

²Instrumento que mide la radiación global (directa y difusa) que se recibe en todas direcciones sobre un plano horizontal

cilíndricos o lineales, que afocan sobre una línea, mientras que los segundos, superficies de revolución o circulares, afocan sobre un punto, tomando una forma continua o por segmentos. En cuanto a los receptores, llegan a tener forma convexa, plana o cóncava. En la figura 1.9 se presentan seis composiciones diferentes de concentradores. En la configuración (a), se muestra un concentrador con un absorbedor tubular y con un reflector difuso en la parte de atrás; en la (b) se tiene un absorbedor tubular con reflectores especulares; en el (c) se tiene un receptor plano con un reflector plano. La relación de concentración obtenida con estos es baja, ya que parte de la radiación difusa que incide en el reflector será absorbida por el receptor; a estos colectores se les denomina *colectores planos con radiación aumentada*; la (d) presenta un reflector de sección parabólica, el cual podría ser una superficie cilíndrica, con receptor tubular, o una superficie de revolución con receptor esférico o hemisferio; en la (e) el reflector parabólico continuo es remplazado por un reflector de Fresnel, el cual consiste en una serie de reflectores planos adyacentes, cuya anchura es menor a la del receptor y cuyas normales están dirigidas a una misma línea o punto de tal manera que concentran la radiación en el receptor, también existe el equivalente refractor de este sistema; finalmente en la configuración (f) los reflectores se encuentran montados y dirigidos individualmente [Duffie y Beckman 1991].

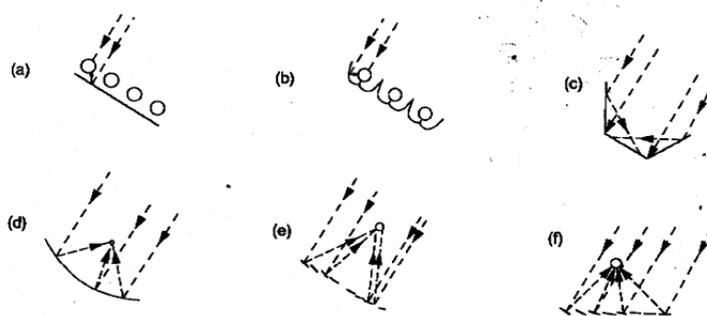


Figura 1.9: Diferentes configuraciones de concentradores.

Los sistemas ópticos cilíndricos-lineales, enfocan la radiación directa hacia el receptor si el sol se encuentra en el plano central del concentrador. Estos colectores pueden rotar para seguir al sol sobre un eje simple, el cual puede ser norte-sur, este-oeste o inclinados y paralelos al eje terrestre, en cuyo caso, la velocidad de rotación es de $15^\circ/\text{hr}$.

Los reflectores que son superficies de revolución circulares, generalmente deben estar orientados de tal manera que el eje y el sol estén alineados, lo cual conllevará a un movimiento en dos ejes. Estos ejes podrían estar orientados en forma horizontal o vertical, o bien, uno de rotación se inclinaría de tal manera que esté paralelo al eje de rotación de la tierra y el otro perpendicular a éste.

Los sistemas de orientación pueden proveer un ajuste continuo o semicontinuo del colector para compensar el cambio de posición solar. Para los colectores lineales, de baja concentración, es posible ajustar su posición en forma semanal, mensual o estacional, dependiendo del diseño.

Los sistemas de orientación continua están basados en una operación manual o mecánica; el primero de estos procedimientos dependerá de la observación del operador y de su destreza para hacer la corrección necesaria por medio del control. Mientras que los sistemas

de orientación mecánica pueden hacerse mediante sensores, con los cuales determinar la desalineación o mediante un programa que mueva el colector de una manera predeterminada, necesitando solo supervisión ocasional para asegurar el alineamiento.

Aunque todos los colectores solares tienen la capacidad de utilizar la radiación directa su capacidad de usar radiación difusa dependerá del factor de concentración que los caracteriza. La concentración de un colector se define como la razón del área de la abertura entre el área del receptor (1.11).

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1.11)$$

Este cociente se refiere a qué tanto un colector logra aumentar la densidad de flujo de energía en el receptor, aumentando consecuentemente la temperatura de operación del sistema (figura 1.10). Específicamente un colector con factor de concentración (C), utiliza una fracción (1/C) de la radiación difusa.

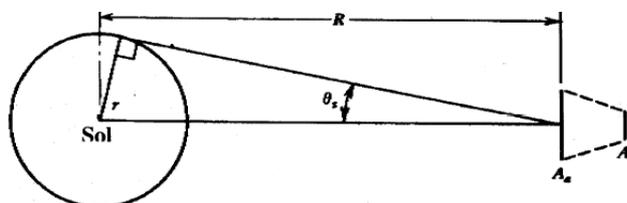


Figura 1.10: Esquema del Sol a una distancia R de un concentrador con área de apertura A_a y área del receptor A_r [Duffie y Beckman, 1991].

Con todo lo anterior podemos suponer que la relación de concentración de un colector solar llega a ser una magnitud variable (de acuerdo a su geometría).

La definición de concentración geométrica no presenta ninguna restricción sobre la máxima concentración posible; en principio, si el área del receptor se hace tan pequeña como se quiera, la relación de concentración crecerá tendiendo a infinito; sin embargo, existe un límite termodinámico para esta. Este límite está basado en la segunda ley de la termodinámica, aplicada al intercambio de radiación entre el Sol y el receptor.

Para un concentrador perfecto, toda la energía que pasa por la abertura debe de llegar al receptor, por lo tanto, la fracción de energía que sale del Sol y llega a la abertura debe ser igual a la fracción de energía que sale del Sol y llega al receptor. La razón de concentración no puede exceder el recíproco del factor de configuración geométrico entre la abertura y la fuente.

Los colectores se han clasificando en dos grupos generales: *lineales de imagen (óptica de enfoque)* y de *no imagen (óptica anidólica)*.

Con la óptica conveccional de enfoque, se logra la captación de energía mediante el uso de lentes o espejos parabólicos, sin embargo, en estas circunstancias se requiere de ajustes continuos para el seguimiento del Sol. Esto se puede entender si se tiene en cuenta que un paraboloide es una superficie en la que todos los rayos que llegan paralelos al eje de simetría se reflejan y pasan por el foco, enfocando sólo la radiación directa.

Para evitar el uso de seguidores solares, se han diseñado espejos en donde los rayos que inciden entre cero y un valor máximo (ángulo de aceptación) se reflejan y llegan a una

superficie absorbedora.

La óptica anidólica es la rama de la óptica geométrica que estudia la transferencia de energía radiante entre la fuente luminosa y el receptor de una manera eficiente. Para conseguir alta eficiencia, no es necesaria la condición de formación de imagen (aunque no queda excluida) y, por lo tanto, no es necesaria una correspondencia punto a punto. De esta manera se obtiene un sistema óptico que está compuesto de un menor número de superficies, las cuales son más tolerantes a errores de fabricación.

Estos tipos de colectores son estáticos (sin orientación solar), llegando a funcionar estacional o anualmente con un mínimo de ajustes en su posición, pudiendo alcanzar un alto factor de concentración gracias a la forma geométrica de su superficie reflectiva; por ejemplo, en el caso de aplicaciones térmicas, con una orientación adecuada, pueden conseguir hasta siete horas diarias de aprovechamiento solar efectivo.

Para realizar los objetivos de esta tesis utilizamos un colector de óptica anidólica, el cual será descrito en el siguiente apartado.

1.6. Superficies selectivas para colectores solares

El comportamiento ideal de un cuerpo negro sirve de estándar para comparar el desempeño de los cuerpos radiantes reales dependiendo de muchos factores, tales como el acabado de la superficie, temperatura, longitud de onda de la radiación, ángulo de incidencia y distribución espectral.

Las impurezas son una de las causas de los cambios en las propiedades radiativas de los materiales. Impurezas, en este contexto, incluyen contaminantes de cualquier tipo, los cuales provocan la variación de las propiedades de superficie. Los contaminantes más comunes son películas delgadas de material depositado o absorbido en la superficie, tal es el caso del vapor de agua de reacciones químicas. Un ejemplo típico de esto último es la presencia de una película delgada de óxido metálico.

Se usan varias propiedades para describir el comportamiento radiativo de los materiales: emitancia, absortancia, reflectancia y transmitancia; en la figura 1.11 se presenta cada una de ellas.

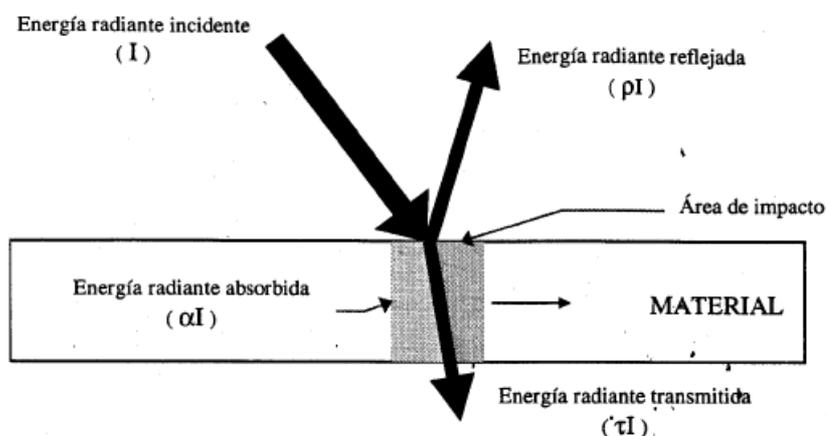


Figura 1.11: Energía radiante que incide sobre una superficie.

- *Emitancia*, (ϵ): Propiedad que mide la virtud de un cuerpo para radiar energía; experimentalmente, es medida en una dirección normal a la superficie y como una función de la longitud de onda.
- *Absortancia*, (α): Definida como la fracción absorbida por un cuerpo del total de la energía incidente sobre de él. La distribución espectral de la radiación incidente es independiente de la temperatura o de la naturaleza física de la superficie absorbente.
- *Reflectancia*, (ρ): Propiedad que denota la fracción del total de energía que es rechazada por la superficie de un cuerpo. Dependiendo del ángulo con el cual incide la energía sobre la superficie y la dirección de la energía reflejada.
- *Transmitancia*, (τ): Propiedad de algunos cuerpos de transmitir una fracción de energía radiante que habiendo ingresado a una capa de material absorbente, alcanza el límite más alejado.

Con base en la anterior descripción de superficies selectivas, la selección de materiales para la construcción de un colector solar deberá tomar en cuenta las siguientes características:

1. Elevada transmitancia de ondas cortas (baja reflectancia).
2. Baja transmitancia de ondas largas (elevada reflectancia).
3. Baja absortancia de cualquier longitud de onda.
4. Excelente resistencia al clima y larga duración.

Que sean efectivos a la transmitancia dependerá de las propiedades de la superficie; ejemplos de materiales que presentan esta característica son la plata y el aluminio, los cuales reflejan longitudes de onda que están dentro del visible y del infrarrojo. La lámina metálica pulida, en general, está compuesta de tres tipos de capas:

- Una placa de vidrio perfectamente plana y pulimentada.
- Capa que se deposita en la anterior mediante un proceso químico o electroquímico (anodización), de un material metálico, generalmente plata o aluminio.
- Unas láminas de plástico muy finas o películas delgadas, cuya misión es proteger a las otras dos capas del medio exterior (oxidación, ataques químicos y suciedad), ya que la corrosión y la erosión destruyen las propiedades ópticas del metal.

La plata podría ser la mejor opción para ser usada como reflector, pero tiene pobres propiedades anticorrosivas, lo que, junto a su elevado precio, limita su uso, y en consecuencia, es sustituida por hojas de aluminio, las cuales son relativamente baratas.

En cuanto al absorbedor, este debe tener una alta absortancia de la radiación solar visible y una baja emitancia de las radiaciones de onda larga (infrarrojo). Las pérdidas por emisión las minimizamos al aplicar un sustrato de baja emitancia.

Actualmente se cuenta con dos tipos generales de recubrimientos: superficies selectivas

y no selectivas. Las primeras se definen en términos de energía por longitudes de onda, absorbiendo una gran cantidad de energía de onda corta y emitiendo muy poca radiación térmica (infrarrojo). Esto también se aplica para las no selectivas; la diferencia es que emiten una gran cantidad de radiación térmica.

La figura 1.11 muestra el comportamiento de una superficie. En el caso de una superficie selectiva ideal esta reflejaría menos del cinco por ciento y absorbería el otro 95 %. Las superficies realmente selectivas no tienen una longitud de onda crítica bien definida, de manera que los valores de emisión responden a las temperaturas de la superficie. En el cuadro 1.2, se presentan algunas pinturas selectivas diseñadas para aplicaciones de la energía solar.

Tipo de superficie	α	ϵ
Negro de Ni sobre Ni	0.93	0.06
Negro de Cr sobre Ni	0.92	0.10
Negro de Fe sobre acero	0.90	0.10
Negro de Cr	0.90	0.10

Cuadro 1.2:

La cubierta de vidrio de los colectores al contar con opacidad a la radiación infrarroja cercana, permitan la entrada a la mayor cantidad de energía solar, dicha cualidad es determinada fundamentalmente por el contenido de hierro en el material. El óxido de hierro es un aditivo usual en la fabricación de vidrio debido a su buena temperatura de fusión. Actualmente, los fabricantes de colectores solares utilizan vidrio extraclaro (con bajo contenido en hierro) para aumentar la transmisión, y templado, otorgando un mejor funcionamiento al colector.

Para propósitos de construcción, se desea estar en posibilidad de manejar las propiedades radiativas de las superficies para incrementar o disminuir su capacidad natural de absorber, emitir o reflejar energía radiante. Esto se puede hacer para proporcionar dos tipos generales de comportamiento: un desempeño espectral deseado, o bien, sus características direccionales.

1.7. Descripción del dispositivo

En la figura (1.12) se muestra el colector que utilizamos para el estudio termodinámico. Sus componentes son:

1. Receptor (lámina superpulida).
2. Absorbedor (tubo).
3. Estructura de madera.
4. Vidrio.
5. Medidor de presión y temperatura.

Se fabrica con una lámina superpulida (espejo de primera superficie), con un espesor de 0.016 in y una reflectancia mínima de 86 %.

La lámina pulida del colector es la que recoge la energía transmitida a través de la cubierta de vidrio y tiene por objetivo dirigir y reflejar la luz útil hacia el absorbedor, consiguiendo el máximo aprovechamiento y evitando pérdidas innecesarias; para eso deberá estar compuesta por materiales que sean altamente efectivos en la reflexión de la radiación.

En el centro del colector se colocó un tubo el cual tiene una longitud de 1.52 m y un diámetro exterior de 3.84 cm, para que este absorba la mayor cantidad posible de energía, la cual será utilizada en procesos posteriores. El absorbedor es pintado de negro, con acabado mate (no brillante), la parte exterior del tubo, ya que una superficie negra maximizará la absorción de la energía incidente, pero desafortunadamente esto también crea pérdidas por emisión. La principal función del tubo es absorber la radiación incidente y transferirla con mínimas pérdidas a un fluido de trabajo (en nuestro caso, agua).

Por su parte, la cubierta de vidrio del colector debe permitir la entrada de la mayor cantidad de energía solar, de manera tal que pueda llegar a la lámina, pero al mismo tiempo no dejar escapar al exterior los rayos emitidos por el interior del colector.

Para el estudio del dispositivo fueron colocados en cada uno de los extremos del tubo, sensores para la medición de presión y temperatura (un captor piezoeléctrico y una resistencia de platino), capaces de ser conectados a una interface de conversión analógico-digital, conectada a una PC. Todo el dispositivo antes descrito se encuentra montado en un esqueleto de madera, y en la parte superior del colector se colocó una cubierta con una placa de vidrio transparente.



Figura 1.12: Colector solar prototipo; con este se realizaron todas las mediciones para la realización de esta tesis.

1.8. Descripción del diseño de la curva del colector solar prototipo

La distribución espacial de la radiación reflejada por una superficie al incidir sobre ella un haz de luz de radiación, presenta dos comportamientos:

- Reflexión especular. El ángulo de incidencia y el reflejado son iguales, estando contenidos, junto con la normal al espejo, en el mismo plano (leyes de la reflexión).
- Reflexión difusa. Se eliminan todas las características de la radiación incidente, distribuyendo la radiación uniformemente en todas direcciones.

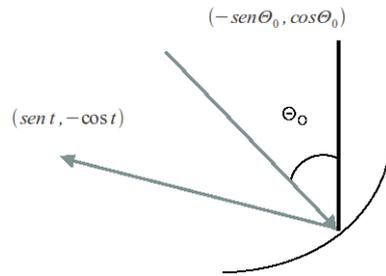


Figura 1.13: Rayo incidente y reflejado.

El diseño del concentrador resultante se compone de dos geometrías diferentes; la primera corresponde a la sección de involuta, generada a partir de las dimensiones del receptor cilíndrico y la segunda corresponderá al segmento de una parábola cuyo eje tiene un ángulo de aceptación (Θ_c) con respecto al eje vertical del colector. Como se muestra en la figura 1.17, está geometría permitirá que todos los rayos que son captados se reflejen hacia la superficie del receptor.

Iniciaremos la descripción de la ecuación de la curva de la lámina reflejante, cuando al incidir un rayo sobre la superficie, esta y el eje de simetría y la vertical forman un ángulo (θ_0):

$$(-\text{sen}\theta_0, \text{cos}\theta_0) \quad (1.12)$$

El rayo reflejado por su parte deberá ser tangente al absorbedor, a partir de esta especificación la dirección del rayo reflejado estará dada por la parametrización del círculo (absorbedor), el cual por comodidad de trabajo fue elegido con $r=1$:

$$\alpha = (\text{sen } t, -\text{cos } t) \quad (1.13)$$

α' es el vector que apunta en la dirección del rayo reflejado normalizado:

$$\alpha' = (\text{cos } t, \text{sen } t) \quad (1.14)$$

Los dos rayos (ec. 1.12 y 1.14) cumplen la ley de reflexión ($\theta_i = \theta_r$), siendo su bisectriz normal al espejo:

$$(cost - sen\theta_0, sent + cos\theta_0); \quad (1.15)$$

la tangente a la superficie es entonces:

$$(sent + cos\theta_0, -cost + sen\theta_0); \quad (1.16)$$

esto nos da la derivada de la curva:

$$(x', y') \propto (sent + cos\theta_0, -cost + sen\theta_0)$$

de donde con el vector tangente a la curva multiplicado por un factor, se puede determinar la dirección de la curva

$$\begin{aligned} x' &= f(t)(sent + cos\theta_0) \\ y' &= f(t)(-cost + sen\theta_0) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Ahora, si estudiamos la curva desde el centro de la circunferencia, al origen su descripción está determinada por:

$$(x, y) = (sent, -cost) + k(t)(cost, sent) \quad (1.18)$$

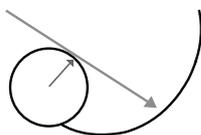


Figura 1.14: Descripción de la curva desde el centro de la circunferencia.

Reescribiendo el vector por coordenadas, se obtienen ecuaciones para la derivada y para las coordenadas x, y :

$$\begin{aligned} x &= sent + k(t)cost \\ y &= -cost + k(t)sent \end{aligned} \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} x' &= cost + \frac{dk}{dt}cost - k(t)sent \\ y' &= sent + \frac{dk}{dt}sent + k(t)cost \end{aligned} \quad (1.20)$$

Igualando las ecuaciones (1.12) y (1.14):

$$\begin{aligned}
f(t)(\text{sent} + \text{cos}\theta_0) &= \text{cost} + \frac{dk}{dt}\text{cost} - k(t)\text{sent} \\
f(t)(-\text{cost} + \text{sen}\theta_0) &= \text{sent} + \frac{dk}{dt}\text{sent} + k(t)\text{cost}
\end{aligned} \tag{1.21}$$

Con este sistema de ecuaciones es posible determinar $f(t)$ y $k(t)$; al reescribir las ecuaciones (1.21), se tiene:

$$\begin{aligned}
f(t)\text{cos}\theta_0\text{cost} &= \text{cost}^2\left(1 + \frac{dk}{dt}\right) - \text{cost}\text{sent}(k(t) + f(t)) \\
f(t)\text{sen}\theta_0\text{sent} &= \text{sent}^2\left(\frac{dk}{dt} + 1\right) + \text{sent}\text{cost}(k(t) + f(t)),
\end{aligned} \tag{1.22}$$

de donde:

$$\begin{aligned}
\left(1 + \frac{dk}{dt}\right) &= f(t)(\text{cos}\theta_0\text{cost} + \text{sen}\theta_0\text{sent}) \\
f(t) + k(t) &= f(t)(-\text{sent}\text{cos}\theta_0 + \text{cost}\text{sen}\theta_0).
\end{aligned} \tag{1.23}$$

Estas últimas expresiones forman un sistema de ecuaciones lineales de primer grado para k y f . Para obtener las soluciones, simplificamos las ecuaciones (1.23):

$$\left(1 + \frac{dk}{dt}\right) = f(t)\text{cos}(t - \theta_0) \tag{1.24}$$

$$f(t) + k(t) = -f(t)\text{sen}(t - \theta_0) \tag{1.25}$$

Despejamos k de la ecuación (1.25):

$$k = -f \{1 + \text{sen}(t - \theta_0)\} \tag{1.26}$$

y este resultado lo sustituimos en la ecuación (1.24):

$$-1 + \frac{d}{dt} [f \{1 + \text{sen}(t - \theta_0)\}] = -f\text{cos}(t - \theta_0) \tag{1.27}$$

de donde obtenemos la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{df}{dt} + \frac{2f\text{cos}(t - \theta_0)}{1 + \text{sen}(t - \theta_0)} = \frac{1}{1 + \text{sen}(t - \theta_0)} \tag{1.28}$$

La solución general de la ecuación es:

$$f = \frac{t + C - \cos(t - \theta_0)}{(1 + \sin(t - \theta_0))^2} \quad (1.29)$$

y el resultado (1.26) lo sustituimos en la ecuación (1.21) para obtener:

$$k = - \left[\frac{t - C - \cos(t - \theta_0)}{1 + \sin(t - \theta_0)} \right] \quad (1.30)$$

La ecuación (1.30), forma parte de la ecuación (1.19) y así es como obtenemos la primera parte de la curva que deberá de tener la lámina reflejante de nuestro colector:

$$\begin{aligned} x &= \text{sent} - \frac{t - C - \cos(t - \theta_0)}{1 + \sin(t - \theta_0)} \text{cost} \\ y &= -\text{cost} - \frac{t - C - \cos(t - \theta_0)}{1 + \sin(t - \theta_0)} \text{sent} \end{aligned} \quad (1.31)$$

La característica central de esta curva es que todos los rayos que lleguen con un ángulo θ_0 respecto a la vertical, al reflejarse en el espejo pasarán tangentes al absorbedor, mientras que los ángulos de incidencia menores al ángulo θ_0 llegarán directo al absorbedor. Para obtener la segunda parte de la curva, será necesario considerar el área debajo del absorbedor (círculo):

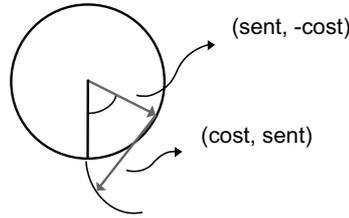


Figura 1.15: Características de la primera curva.

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{sent} - t\text{cost} \\ y(t) &= -\text{cost} - t\text{sent} \end{aligned} \quad (1.32)$$

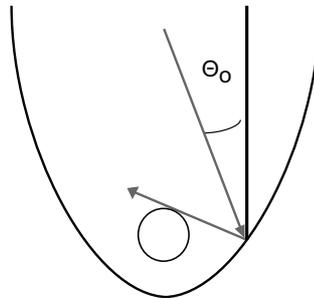


Figura 1.16: Formación de la involuta, debajo de la curva.

Con una superficie reflectante que siga la forma de una involuta, se consigue concentrar sobre el absorbedor (círculo) toda aquella radiación (independiente de la trayectoria de los rayos) que llegue con un ángulo entre 0 y θ_0 (medido a partir del eje de simetría). Las dos curvas establecidas por las ecuaciones: (1.31) y (1.32) determinarán la forma final de la lámina; para eso, será necesario pegarlas:

$$\begin{aligned} x(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) &= \text{sen}(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) - \frac{(t + C)}{2} \cos(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) \\ y(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) &= -\text{cos}(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) - \frac{(t + C)}{2} \text{sen}(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (1.33)$$

de donde:

$$\begin{aligned} \frac{\frac{\pi}{2} + \theta_0 + C}{2} &= \frac{\pi}{2} + \theta_0 \\ C &= \frac{\pi}{2} + \theta_0 \end{aligned} \quad (1.34)$$

Establecido el valor de la constante C , reescribimos las ecuaciones (1.31).

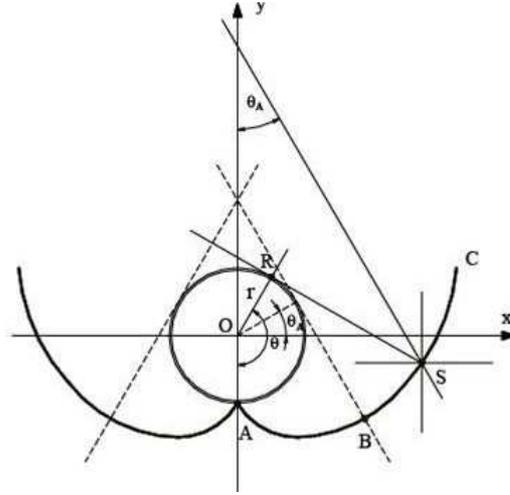


Figura 1.17: Esquema de la sección transversal del colector.

Por lo tanto, la expresión analítica final de nuestra curva (figura 1.17), viene dada por dos porciones separadas: una involuta ordinaria para el tramo entre A y B y una porción exterior desde B a C, expresadas respectivamente por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{sen}t - \text{cost} \\ y(t) &= -\text{cost} - t \text{sen}t \end{aligned} \quad (1.35)$$

para:

$$t \leq \theta_0 + \frac{\pi}{2}$$

$$\begin{aligned} x &= \text{sent} - \frac{t - \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \cos(t - \theta_0)}{1 + \text{sen}(t - \theta_0)} \text{cost} \\ y &= -\text{cost} - \frac{t - \frac{\pi}{2} + \theta_0 - \cos(t - \theta_0)}{1 + \text{sen}(t - \theta_0)} \text{sent} \end{aligned} \quad (1.36)$$

para:

$$t \geq \theta_0 + \frac{\pi}{2}$$

Los colectores de óptica anidólica tienen la capacidad de reflejar al receptor toda la radiación incidente sobre la abertura en el rango del ángulo de incidencia, el cual presenta límites muy amplios.

El *ángulo de aceptación* o *Campo de visión* es el intervalo sobre el cual todos los rayos incidentes son captados sin movimiento del concentrador.

Welford y Winston (1978) establecen los límites para la concentración máxima considerando la mitad del ángulo de aceptación (θ_0). Esta dependerá de la configuración del concentrador, es decir, si este es bidimensional o tridimensional respectivamente.

$$\begin{aligned} C_{max,2D}(\theta_0) &= \frac{1}{\text{sen}(\frac{\theta_0}{2})} \\ C_{max,3D}(\theta_0) &= \frac{1}{\text{sen}^2(\frac{\theta_0}{2})} \end{aligned} \quad (1.37)$$

Los valores normales para el ángulo de aceptación en el caso de aplicaciones termodinámicas, van a estar entre los $\frac{\pi}{18}$ y $\frac{\pi}{2}$ grados. Este amplio ángulo de aceptación permite al receptor captar tanto la luz directa como gran parte de la difusa.

Un caso especial es aquel en el que se tiene $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$, con lo que el factor de concentración será igual a uno y la curva será una involuta ordinaria (los puntos B y C son coincidentes). Cuando esto ocurre, toda la radiación que alcanza el área de abertura puede ser captada y reflejada al absorbedor. La luz reflejada es distribuida hacia la parte posterior del receptor tubular con lo que la casi totalidad de la circunferencia del receptor queda iluminado.

1.9. Determinación de las dimensiones del área de abertura del colector

Las tablas de radiación proporcionan una información lo suficientemente representativa del valor de la radiación solar en un determinado periodo de tiempo. Constituyen el método de consulta más efectivo cuando no se conocen datos de radiación instantánea; son datos recopilados por las estaciones meteorológicas, utilizando una instrumentación adecuada.

En nuestro caso los parámetros meteorológicos utilizados para la construcción del colector nos fueron proporcionados por el Taller de Meteorología de la **Facultad de Ciencias** de la UNAM. Este taller mide la irradiancia solar por medio de un piranómetro termoelectrico.

Este cuenta con un ancho de banda de $0.3 \mu m$ a $3 \mu m$, mientras que el elemento receptor del aparato está debidamente aislado (herméticamente cerrado) por dos domos de vidrio resistentes a la corrosión del aire húmedo y protegido de la irradiancia que regresa del suelo y los alrededores, pero sin dejar de estar libremente expuesto al hemisferio celeste. También cuenta con un elemento sensible (pila termoelectrica) constituida por termopares colocados en serie que generan una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperaturas entre sus uniones, las cuales se encuentran en contacto térmico con placas metálicas que se calientan de forma distinta cuando están iluminadas. Por lo tanto, una diferencia de potencial medida en la salida del instrumento puede ser relacionada con el nivel de irradiancia (1.18).

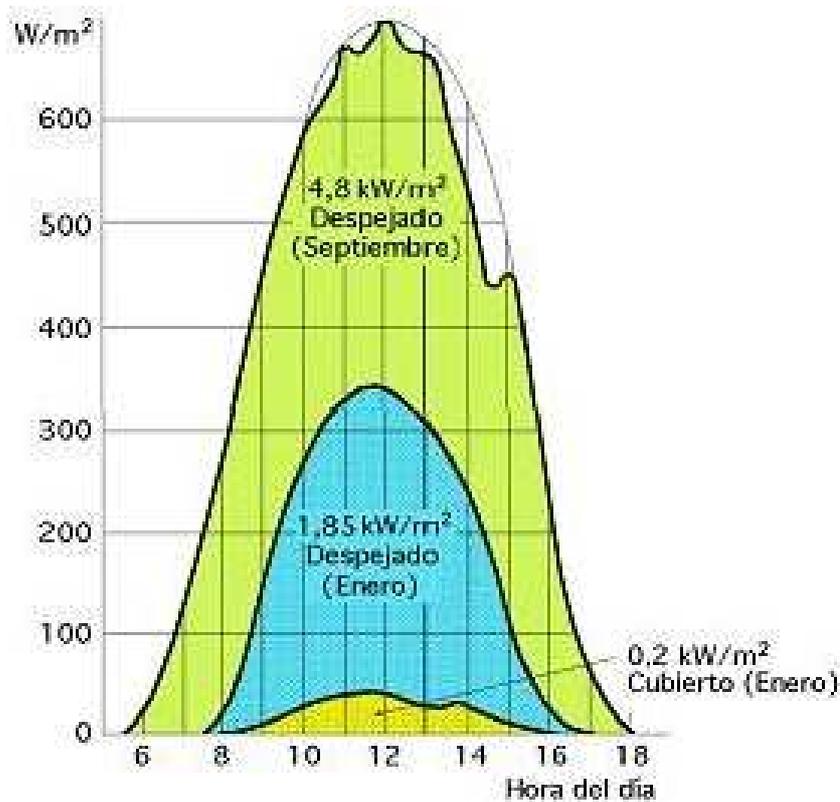


Figura 1.18: En esta imagen se presenta una gráfica de irradiancia de diferentes días uno despejado, seminublado y cubierto de nubes.

De esta manera se pudo trabajar con datos de radiación global de un año meteorológico como referencia, registrado minuto a minuto. El primer análisis que se hizo fue el de identificar los días claros, nublados y lluviosos que se tuvo durante el 2009. Se consideró día claro a aquél en el que la radiación solar directa sigue su evolución establecida, creciendo por la mañana, alcanzando su punto máximo en el mediodía solar

y decreciendo por la tarde sin que su forma se vea prácticamente afectada por transitorios de nubes. También se considera día claro a aquél que comienza de acuerdo con la evolución dicha anteriormente, pero a partir del mediodía, la curva de la radiación se ve afectada por periodos súbitos de no insolación. En las siguientes graficas 1.19 y 1.20 se presentan dos días que cumplen las características antes descritas de días claros o soleados, con los datos del Taller de Meteorología de **Facultad de Ciencias** de la UNAM.

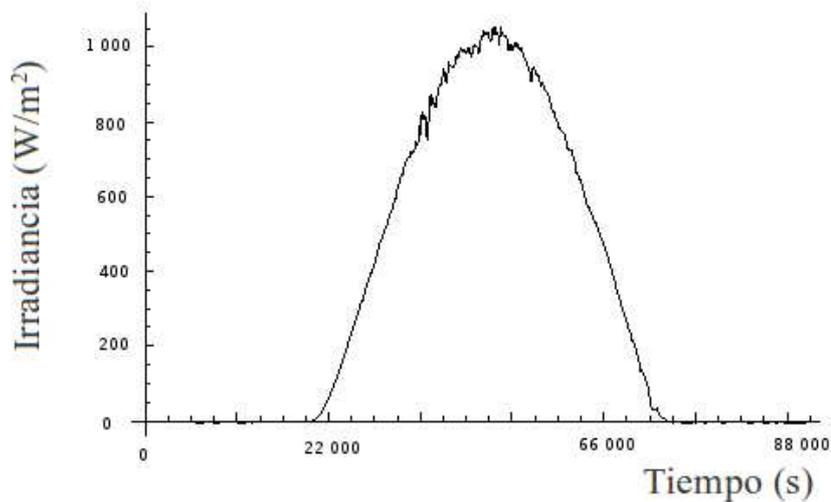


Figura 1.19: Registro de un día claro: 08 de septiembre de 2009. En esta gráfica, el flujo solar es abundante, refleja la ausencia de nubes.

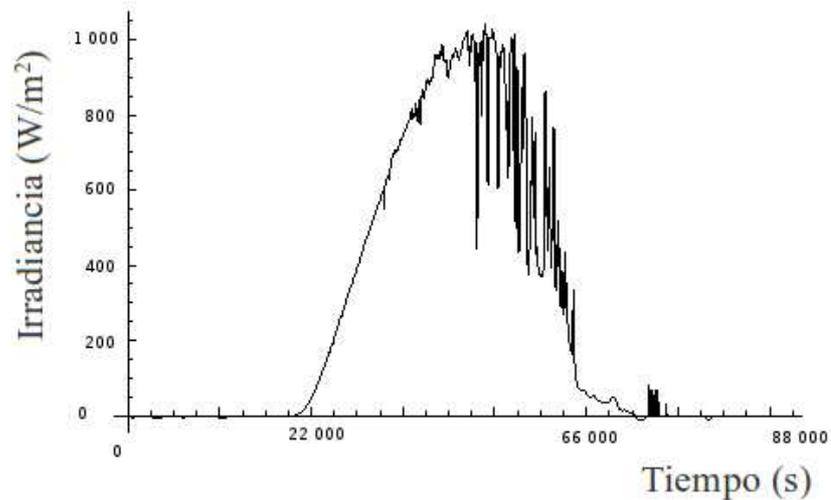


Figura 1.20: Registro de una jornada mixta: 04 de septiembre de 2009. El día se inició con un cielo despejado, permitiendo así el paso directo del sol, pero esto declinó por la tarde, y el día terminó nublado.

En la gráfica de la figura 1.20, muestra el resultado de un día despejado en donde la radiación difusa en un día así es la que proviene del cielo azul, mientras que en un día

nublado la redistribución de la radiación es mucho más notable.

Por el contrario, se considera día nublado aquel en el que la curva de radiación solar se ve afectada en su totalidad o por intervalos frecuentes de no insolación. En este caso, también se considera día nublado a aquél que comienza con muchos intervalos de nubes y, a partir del mediodía, se despeja (figura 1.21).

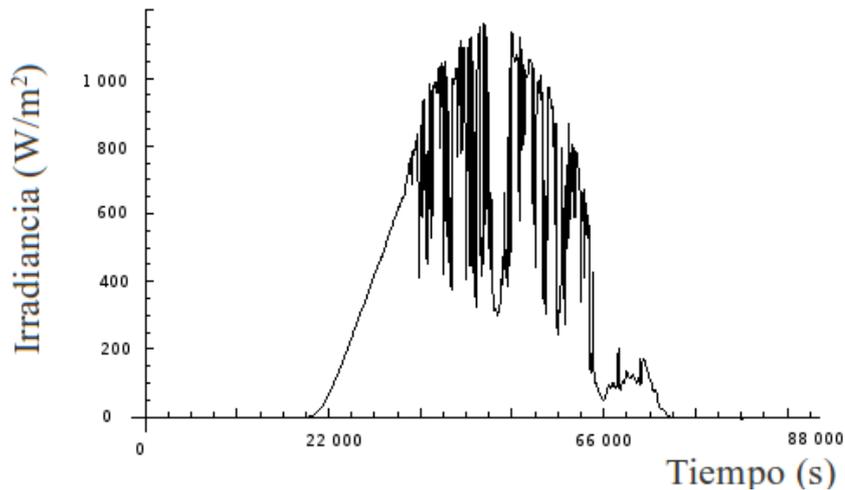


Figura 1.21: Registro de un día lluvioso: 24 de septiembre de 2009. Desde el principio la ausencia de un sol pleno es evidente; la caída en los registros muestra nubes y la inevitable presencia de lluvia.

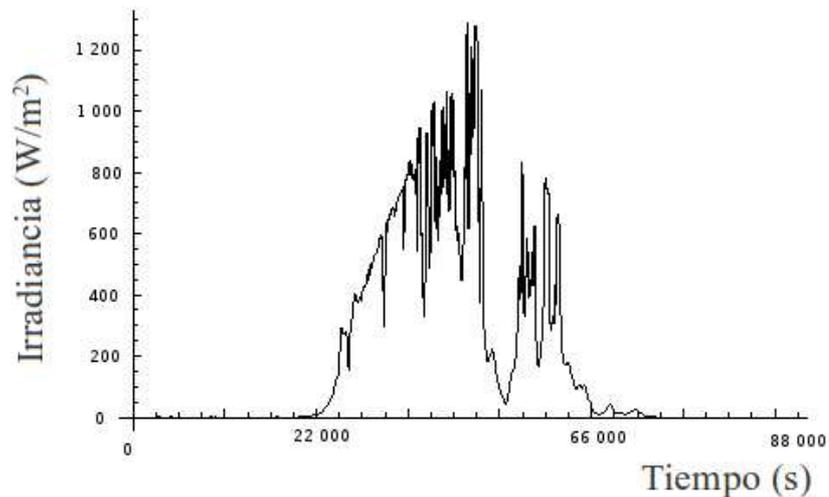


Figura 1.22: El piranómetro registró el 16 de septiembre de 2009, día en el cual la presencia de nubes es evidente; los picos que se pueden observar en la gráfica, muestra que fueron pocos los periodos de Sol que se tuvieron.

Como se puede observar en la figura 1.22, la radiación se ve afectada por imprecendidos periodos de nubes, lo que da como resultado la presencia de pocos lapsos del día con un

cielo limpio. Cuando la irradiancia medida está muy por debajo de la atmósfera clara, se debe generalmente a la aparición de nubes o la turbiedad de la atmósfera.

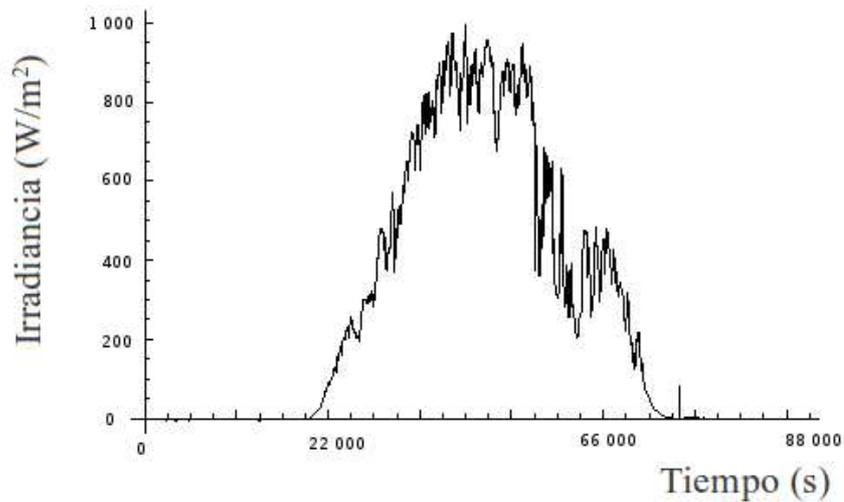


Figura 1.23: El piranómetro registró el 28 de septiembre de 2009, día en el cual la presencia de nubes es evidente, pero si se logra a apreciar la curva.

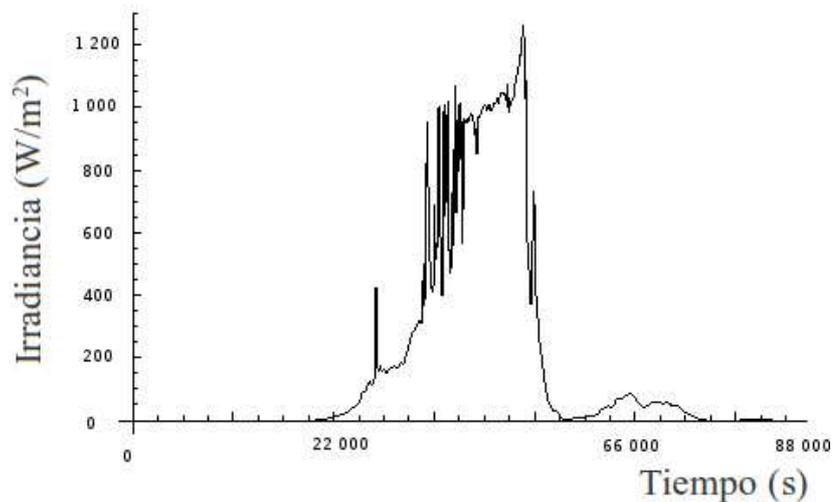


Figura 1.24: El piranómetro registró el 15 de septiembre de 2009 un día extremadamente nublado.

También se pueden observar días en los cuales se tenga una combinación de curvas, como en la figura 1.23 que muestra durante la mañana un ambiente despejado, pero la nubosidad comienza a aumentar por la tarde, creando un ambiente de posible lluvia, el cual desaparece aproximándose por la noche.

En el caso de la figura 1.24, el clima lluvioso y se mantiene en gran parte del día, propiciando la ausencia de sol durante toda la jornada.

Por último, podemos tener algunos casos extremos, en donde la presencia del sol es nula, como se ve en la figura 1.25, lo que significa problemas para un sistema concentrador, excepto a las 11 horas con 40 minutos, cuando aparece una pequeña modulación (pico).

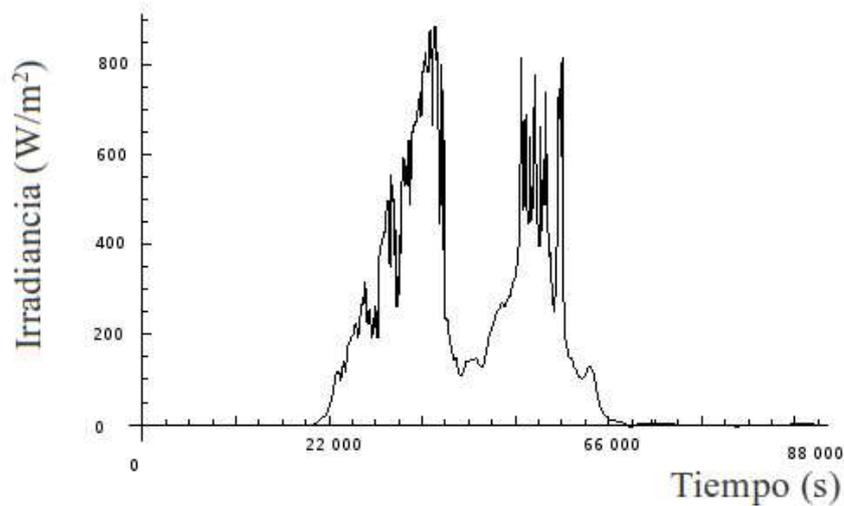


Figura 1.25: El piranómetro registró el 12 de septiembre de 2009 un día extremadamente nublado.

En la figura 1.26 se muestran las curvas de radiación, por día, que se obtuvieron durante el mes de septiembre de 2009. La representación del flujo solar con respecto al transcurso del tiempo-día, puede ser modificados por la nubosidad, ya que las nubes causan un albedo muy alto y son capaces de absorber radiación solar. En un día densamente nublado una gran parte de la radiación solar que llega a tope de la atmósfera no llega a la superficie terrestre. En cada una de las gráficas, el tiempo de escala corre desde la mañana (izquierda), hasta la noche.

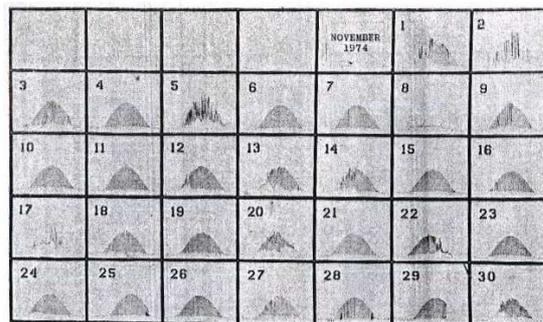


Fig. 2.17 Solar flux data by days for the month of September 1974 for Tucson, Arizona. Recordings were made by McKenney (1974) using a Helio viewing shadow bar pyranometer. Note the number of days having considerable total energy but consisting of frequently interrupted direct sun plus enhanced scattered light.

Figura 1.26: Curva de radiación del mes de septiembre del 2009.

Como ya habíamos mencionado, el dispositivo, al ser un colector prototipo en su construcción las consideraciones prácticas (material disponible y costos de construcción

accesibles) tuvieron mayor peso que consideraciones técnicas más precisas. Entonces, saber cuanta energía es capaz de recolectar del medio, nuestro dispositivo es significativo. Con las variaciones de energía incidente por unidad de área (A), se maneja la siguiente relación:

$$dE = I(t)Adt \quad (1.38)$$

Al integrar la irradiancia durante un período de tiempo específico, generalmente una hora o un día, se obtiene la energía solar que recibe la superficie del colector.

$$E = A \int I(t)dt \quad (1.39)$$

Mientras que la estimación de la integral que aparece en la ecuación 1.39, la obtengo con:

$$I_{prom} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} I dt \quad (1.40)$$

en donde T es el periodo.

Ahora bien, con las mediciones meteorológicas de radiación solar que se obtuvieron durante 2009, se hizo una selección por día, de la hora con mayor radiación incidente, acotando alrededor de esta un periodo total de cuatro horas (dos antes y dos después); se obtuvo con estos el resultado de un promedio mensual, los cuales mostramos en el cuadro 1.3.

Mes	Promedio W/m^2
Enero	622.32
Febrero	709.50
Marzo	838.07
Abril	835.18
Mayo	729.61
Junio	731.43
Julio	735.98
Agosto	740.54
Septiembre	581.57
Octubre	609.00
Noviembre	588.94
Diciembre	588.94

Cuadro 1.3: Promedio mensual de la irradiancia de 2009.

Así el promedio anual de irradiancia durante 2009 fue de 692.7759 W/m^2 . de donde:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} I dt = 9\,975\,973.012 \text{ J/m}^2 \quad (1.41)$$

Por lo tanto, sustituyendo la Ec.(1.41) en la Ec.(1.39) la energía que el colector capta del medio por unidad de área es:

$$\frac{E}{A} = 9\,975\,973.012 \text{ J/m}^2 \quad (1.42)$$

Con la información de la energía que nos proporciona el medio y la energía que se quiere capturar con el colector, se puede determinar las dimensiones que deberá tener nuestro colector, ecuación (1.42).

El colector solar prototipo al tener un área de abertura de 0.39658 m^2 , es capaz de recolectar $3\,956\,271.377 \text{ J}$ de energía. Siendo así la potencia solar total relacionada al área del colector, durante cuatro horas de exposición fue de 274.74 W , a modo de comparación una parrilla eléctrica o una plancha, que son artefactos que más consumen en una casa usan aproximadamente $2\,000 \text{ W}$.

Como se puede observar el área de abertura dependerá de la cantidad de energía que se quiere coleccionar y la irradiancia del lugar, en este último elemento existen ciertas causas que influyen en mayor o en menor medida en el rendimiento del colector. Estos pueden ser de origen interno del dispositivo o ser factores ambientales como temperatura de operación y composición espectral de radiación. Relacionamos directamente estas pérdidas en un factor de proporcional. La irradiancia asociada tiene un valor de $692.775 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ en esta cantidad aun no se considera el factor de pérdidas, que tiene el colector solar al momento de las mediciones.

1.10. Trayectoria de rayos para un colector de óptica anidólica

La expresión analítica de la superficie reflectora que utilizamos para nuestro colector con un absorbedor cilíndrico, fue demostrada en la sección anterior, estableciendo que un punto en el reflector puede ser descrito en términos de dos parámetros: el ángulo de aceptación y la distancia del punto donde toca el rayo incidente-reflejado, tangente al tubo absorbedor.

De acuerdo al diseño del colector éste deberá ser instalado norte o sur horizontalmente con respecto al ecuador, con una inclinación igual a la latitud del lugar, pero no inferior a los 10° , mirando hacia el sur o norte. Al tener presente estas características, el colector recibirá la máxima cantidad de energía, sobre todo al mediodía, puesto que los rayos incidirán perpendicularmente en la superficie reflectora. Haciendo que el colector se pueda mantener fijo la mayor parte del tiempo de uso, adoptando sólo correcciones estacionales de inclinación con respecto al plano horizontal [Almanza y Muñoz, 1994].

A partir de un programa, pudimos apreciar la trayectoria que seguirían los rayos incidentes sobre la curva formada por las expresiones analíticas (1.35 y 1.36).

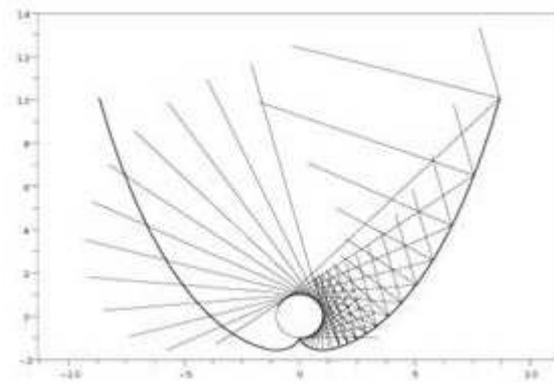


Figura 1.27: Trazado de rayos con un ángulo de incidencia a los 15° .

En la figura 1.27 el colector recolecta toda la luz que ingresa con un ángulo de entrada de 15° con respecto a la normal por la abertura, concentrandola sobre el tubo interno. Como se puede ver los rayos del borde derecho para el tubo son tangentes a él y son reflejados por el espejo como rayos nuevamente tangentes a él. Sin embargo, luego de la refracción los rayos se vuelven tangentes al receptor, de manera que en realidad el espejo en involuta transforma los rayos entrantes tangentes al tubo.

En nuestro caso el colector prototipo fue orientado sobre un eje este-oeste, con una inclinación de 30° hacia el sur con respecto a la vertical. Con esta inclinación los rayos solares llegaban con un ángulo de incidencia menor a los 15° con respecto al eje del espejo. Por lo tanto, el colector al tener un ángulo de aceptación de 15 grados, puede ofrecer operaciones de concentración por periodos de tiempo de tres meses, sin necesidad de ajustar su orientación antes de estos periodos.



Figura 1.28: Trazado de rayos en el colector solar prototipo.

En la figura 1.28 se muestra el comportamiento que tendrían los rayos al chocar con

la superficie del colector (lámina); con un ángulo de incidencia óptimo para el colector en uso (15°); entre la radiación solar directa y el vector normal a la superficie de la curva. Por lo anterior, podemos concluir que la curva tiene la característica de que todos los rayos que inciden sobre ella, con un ángulo de incidencia igual al ángulo de aceptación, al reflejarse, pasan tangentes al círculo. Mientras que, si el ángulo de incidencia es menor al ángulo de aceptación, el rayo al reflejarse va a incidir sobre el círculo (tubo absorbedor).

1.11. Disminución de pérdidas por convección

Todos los cuerpos emiten energía y, a su vez, la absorben de sus inmediaciones. Cuando se alcanza un estado estacionario, la velocidad de emisión y de absorción se vuelven iguales.

Parte de las pérdidas de energía que ocurren en el colector se presentan cuando el aire que está en contacto con el tubo (absorbedor) al calentarse disminuye su densidad y, por lo tanto tiende a elevarse, produciendo una pérdida de calor por convección. Para que esto no suceda, colocamos en la parte superior de la estructura un vidrio que evitará que el aire caliente salga del colector, al igual que la radiación con longitudes de onda correspondientes al infrarrojo emitidas por el absorbedor. La presencia de emisión de energía se dará siempre que la temperatura en el tubo absorbedor sea mayor que la de sus alrededores.

Un colector sin cubierta tiene pérdidas térmicas muy elevadas porque la placa absorbidora está en contacto directo con el ambiente. Tiene lugar una gran diferencia de temperatura entre el tubo absorbedor y el ambiente y, por lo tanto, un aumento en las pérdidas por radiación. Las ventajas de este tipo de colector son la facilidad de limpieza, el acceso directo a sus diferentes componentes para los casos de mantenimiento o avería y el bajo precio.

Por lo tanto, una de las funciones de la cubierta transparente es la de proteger al colector de inclemencias meteorológicas, pero su contribución principal es la de reducir las pérdidas térmicas por convección y radiación (efecto invernadero) que se puedan dar hacia el ambiente.

La cubierta transparente debe absorber la energía que incide sobre una superficie transparente reflejada desde la superficie o transmitida a través de la superficie, es decir:

$$\text{Energía}_{\text{total}} = \text{Energía}_{\text{absorbida}} + \text{Energía}_{\text{reflejada}} + \text{Energía}_{\text{transmitida}} \quad (1.43)$$

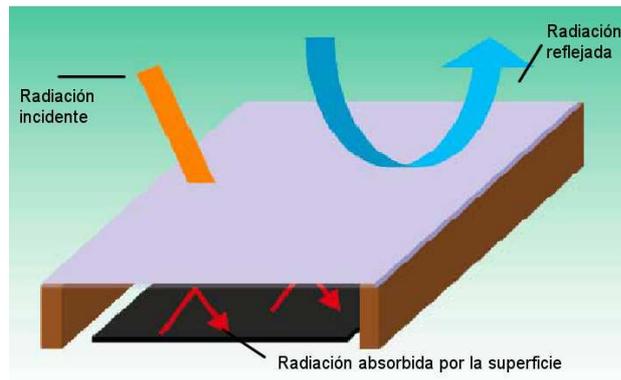


Figura 1.29: Balance térmico del colector sometido a radiación solar.

En la figura 1.29 se aprecia que el calor útil es la diferencia entre la radiación incidente y las pérdidas debidas a la reflexión en el vidrio. La energía incidente por unidad de tiempo que aprovecha el colector está dada por la irradiación global que incide sobre el colector, por la transmitancia de la cubierta y la absorptancia de la superficie absorbente. Al multiplicar esto por el área de captación, se tiene la energía total incidente. Que la energía sea absorbida, reflejada o transmitida dependerá de:

- La longitud de onda de la energía.
- El ángulo de incidencia.
- El índice de refracción del material, (medida relativa que indica qué tanto se desviarán los rayos de energía al atravesar el material).
- El índice de absorción del material, (medida relativa que indica cuánta energía absorberá la superficie).

Una buena cubierta de vidrio del colector debe transmitir la cantidad máxima de energía solar, sin importar el ángulo de incidencia y no desviarla de manera que pueda llegar a la placa de absorción; pero al mismo tiempo debe reflejar la cantidad máxima de energía calórica que pudiera emitir la placa de absorción. Como esta energía calórica tiene una longitud de onda diferente a la de la radiación solar, esto se puede lograr con el mismo material, sin perturbar la transmisión de la energía solar.

Al mismo tiempo, un buen vidrio sobre el colector no debe presentar una superficie reflectora o que pueda absorber gran cantidad de energía. Para fines de captación, la energía reflejada por la cara exterior del vidrio se habrá perdido y lo mismo se puede decir de la energía absorbida por el vidrio, lo cual ayudará un tanto a conservar las temperaturas dentro del colector.

El tubo de absorción del colector es la parte que recoge la energía transmitida a través de la cubierta de vidrio. Debe de ser capaz de recoger y retener esa energía y estar construido en forma tal que el medio de transferencia de calor que fluye en su interior pueda tomarla de modo eficiente. Obviamente, la capa que cubre el tubo de absorción y la sustancia que utilizamos en él son sumamente importantes para la eficiencia del colector.

Para alcanzar altas temperaturas en el absorbedor y, por tanto, conseguir una coexistencia de fases, en nuestro caso líquido-vapor, se deben tomar en cuenta las diferencias de temperatura que surgirán durante todo el día. En las primeras horas de la mañana, la energía recibida será destinada al receptor, mientras transcurre el tiempo y nos aproximemos a las horas de mayor insolación (mediodía solar), en el colector ya estarán presentes las máximas densidades de energía sobre el absorbedor. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del colector sea baja, la temperatura que habrá dentro será mucho más alta para la hora pico, ya que en esos momentos dentro del colector se produce una considerable transferencia de calor.

Por lo tanto, el rendimiento en porcentaje de la radiación incidente transformada en energía térmica en el fluido (en nuestro caso, agua), dependerá de los balances de energía que se produzcan en el absorbedor, los cuales, como hemos visto hasta ahora, se encontrarán limitados por pérdidas de dos tipos: térmicas y ópticas.

Las pérdidas ópticas son responsables de que sólo una parte de la radiación recibida sea absorbida por la placa metálica y consecuentemente transferida al absorbedor, mientras que un porcentaje de la energía absorbida es cedido al entorno y no al fluido del sistema, siendo el rendimiento del colector dependiente de la temperatura del fluido y de la temperatura del entorno.

Para una máxima eficiencia, el colector debe estar cerrado por detrás y por los lados; las pérdidas que se producen por detrás son función de la conductividad térmica del material de construcción. La temperatura ambiental es normamente más baja en la parte posterior que en el frente del colector, puesto que el respaldo no recibe la radiación solar.

Capítulo 2

Balances energéticos en el absorbedor

Un balance energético muestra el conjunto de relaciones de energía en el dispositivo de estudio, contabilizando los flujos físicos de aporte de energía, el intercambio con el exterior y la transformación o consumo de ésta. Permitiendo caracterizar las propiedades termodinámicas del dispositivo.

Existen importantes aplicaciones de la energía solar al convertirla en energía térmica. Entre los principales dispositivos que se construyen para realizar dicha conversión se encuentran los colectores solares. La finalidad de estos dispositivos es la de convertir la energía radiante en energía térmica para aprovecharla en forma de calor.

Sin embargo, estos dispositivos no tienen factores de aprovechamiento altos. En general los colectores solares son poco eficientes en términos técnicos. Las pérdidas de energía térmica dentro de los colectores se dan por fenómenos de radiación, de convección y de conducción.

El conocimiento de las energías o potencias aportadas al proceso, de las energías o potencias de salida y de los factores de transferencia y pérdidas que se presentan en el colector nos permiten conocer el rendimiento global.

El colector prototipo al ser construido con materiales ya existentes en el taller de fluidos del Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias UNAM; se deseaba estudiar su comportamiento térmico. La recolección de energía solar térmica se da principalmente por el absorbedor, un tubo cerrado que contiene agua. En este capítulo, se presenta un análisis del rendimiento en el tubo absorbedor, considerando como únicos parámetros: la radiación solar incidente y las variaciones de temperatura y presión que llegó a tener el agua al momento de poner en uso el colector.

2.1. Pérdidas de energía por transferencias de calor

Además de las pérdidas ópticas y geométricas que se pueden presentar en un colector, descritas en el capítulo 1, existen también pérdidas térmicas. Éstas se producen tanto en el tubo absorbedor como en el colector mismo.

De la radiación solar que incide sobre la cubierta transparente (vidrio) parte es absorbida por éste, parte es reflejada pero la mayor parte es transmitida al interior del colector. Una

porción de la radiación transmitida llega directamente al tubo receptor mientras que el resto es reflejado dentro del colector mismo por la superficie reflejante. De esta última la porción más importante alcanza al tubo y el resto se distribuye en el interior del colector. La radiación que alcanza al receptor es convertida en energía calorífica que se transmite, a través de las paredes del receptor al fluido de trabajo dentro de éste, aumentando su temperatura. Por otra parte, las paredes del tubo radian perdiendo energía, y con esto la energía calientan el aire circundante al absorbedor, haciendo que el colector tenga una temperatura mayor que el exterior. En la figura 2.1 se muestran esquemáticamente los flujos de energía.

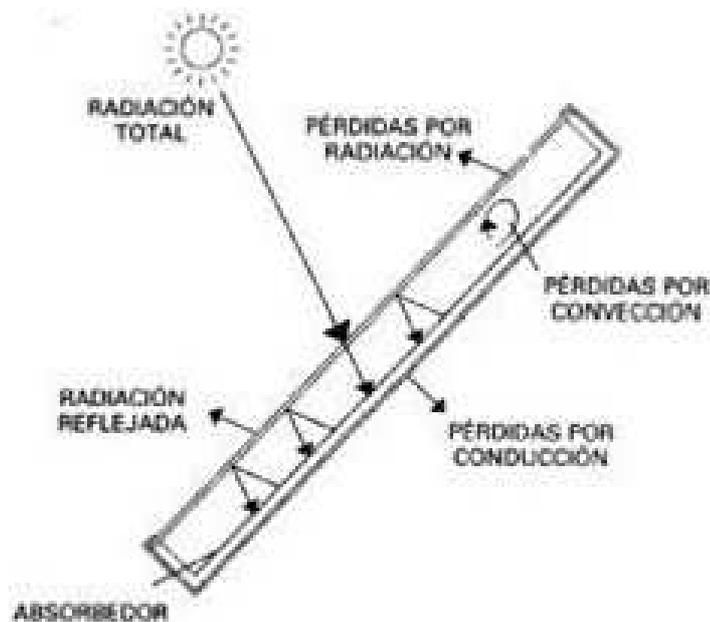


Figura 2.1: Transferencias de calor en un colector solar.

A continuación explicaré la parte correspondiente a las pérdidas, dadas por las transferencias de calor, en el exterior (aire que circula en los alrededores del colector) y interior (el tubo absorbedor, la lámina reflejante y el aire en el interior).

1. Por radiación, esta transferencia se manifestará en el colector sobre: la cubierta de vidrio, la superficie del espejo y en el tubo absorbedor. Las dos primeras se darán a partir de la reflexión sobre las superficies, a radiación global que incida, disminuyendo su valor como resultado de las características propias de absorptividad y reflectividad que tenga cada uno de los materiales involucrados. En el caso de la reflexión en la superficie del espejo, alguna parte de los rayos no alcanza al tubo absorbedor debido a diversas causas, como imperfecciones microscópicas o macroscópicas en el espejo, o por errores de posicionamiento del colector, la fracción no absorbida será reflejada hacia el exterior. Sin embargo los valores de reflectividad disminuyen progresivamente conforme aumenta la suciedad en la superficie, de ahí la importancia de que estas se limpien cada cierto tiempo.

También están presentes las pérdidas por emisión proporcionadas por el tubo absorbedor, las cuales dependerán de la temperatura de la superficie. Parte de la radiación es empleada como calor para calentar agua, la parte restante constituye el almacenamiento de energía en el colector mismo.

2. Por convección, esta transferencia se manifiesta desde la superficie absorbidora al aire interior del colector y de este último con sus alrededores. La convección externa es uno de los mecanismos principales de enfriamiento de las paredes y cubiertas de los dispositivos solares. El aire exterior al estar en contacto con las superficies calientes, remueve el calor de las paredes del dispositivo haciendo que estas bajen su temperatura.

En la parte interior del colector se presenta un fenómeno similar, pues el aire en el interior al tener contacto con el tubo, disminuirá su densidad produciendo una diferencia de temperaturas.

El tubo absorbedor al estar situado dentro de la cubierta de cristal, no deberá presentar tantas pérdidas térmicas por convección; pues como ya se mencionó anteriormente el vidrio tiene como función principal conservar la mayor cantidad de corrientes convectivas en el interior del colector.

3. Por conducción, estas se dan desde el absorbedor a los elementos estructurales y auxiliares que están en contacto con el tubo absorbedor, siendo estas proporcionales a la diferencia de temperatura entre cada uno de ellos. En nuestro caso el mayor contacto que tiene el tubo absorbedor se da con la estructura de madera del colector. Por lo tanto puedo considerar esta pérdida casi despreciable, pues la madera no es un buen conductor.

Hasta el momento sólo hemos descrito las pérdidas por transferencia de calor en el colector solar. A continuación describiremos el camino de las ganancias térmicas que tiene el colector solar en su interior.

La radiación que incide directamente más la radiación que alcanza al receptor por reflexión se transmitirá por conducción a través del espesor del tubo, por tanto el calor se transmitirá íntegramente a la capa de fluido que se encuentre en contacto con la pared, cuya temperatura será superior a la de la masa principal del fluido. Por una combinación de conducción a través de dicha capa y convección en el fluido, el calor realizará su propósito, y es que el agua dentro del receptor varíe su temperatura.

Prescindiendo de la transmisión por radiación, podemos definir un coeficiente de convección h que incluye el efecto combinado de la conducción a través de la citada capa y la convección en el fluido. Así:

$$\dot{Q} = hA\Delta T \quad (2.1)$$

siendo \dot{Q} la velocidad de transferencia de calor por convección, A el área de la pared y ΔT la diferencia de temperaturas entre la superficie y la masa del fluido. El problema fundamental al momento de trabajar la convección de calor, se da al fijar el valor del coeficiente convectivo (h), ya que éste resultará diferente para cada caso en particular que se quiera modelar. Con las propiedades físicas del fluido (temperatura y presión), experimentalmente se podrá ajustar el coeficiente de convección para la pared y los fluidos

involucrados.

Una sustancia puede ser estimulada para emitir radiación térmica, es decir, un sólido, un líquido o un gas pueden difundir ondas electromagnéticas en virtud de su temperatura. Si llegara a existir una diferencia de temperatura entre la sustancia y su entorno, la primera perderá en un intervalo de tiempo dado una cantidad de energía interna igual a la energía radiada menos la energía absorbida, mientras que el entorno ganará una cantidad de energía interna igual a la energía absorbida menos la radiada. La ganancia de uno es igual a la pérdida del otro.

La ganancia o pérdida de energía por radiación y absorción tendrá lugar sólo si existe una diferencia de temperatura; en caso de que estas sean iguales, no se presentará la transferencia de calor.

El conocimiento de los valores de estos parámetros característicos es deseable a la hora de encarar cualquier análisis de comportamiento del sistema, dimensionamiento, simulación, etc.

A continuación plantearé el modelo teórico para la base experimental, con el que se determinó la constante de enfriamiento y el factor de pérdidas que ocurren en el sistema.

El calor de un cuerpo entrega al ambiente o absorbe de él determinadas condiciones, quedando definido cuantitativamente por la ley de enfriamiento de Newton [Worsnop-Flint, 1964; Welty, 1978].

Al considerar solo las pérdidas de calor por el movimiento del aire alrededor del cuerpo (convección), la expresión matemática que tendríamos es:

$$\frac{dQ}{dt} = -hA(T - T_a) \quad (2.2)$$

donde h es el coeficiente de intercambio de calor, constante que define el ritmo del enfriamiento y A el área superficial del cuerpo que se encuentra expuesta al medio ambiente; T es la temperatura instantánea del cuerpo y T_0 es la temperatura ambiente.

Al transferirse la energía de un objeto y por tanto elevar su temperatura, éste experimentará una pérdida de calor, la cual será proporcional a la diferencia de temperaturas, que podemos expresar en forma diferencial como:

$$dQ = mc dT \quad (2.3)$$

donde Q es la cantidad de energía transferida en el proceso, m es la masa del cuerpo y c su calor específico, el signo menos indica una pérdida calorífica. Al combinar las ecuaciones (2.2) y (2.3) obtenemos que:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_a) \quad (2.4)$$

donde k es una constante de proporcionalidad conocida como parámetro de enfriamiento o conductividad térmica ($k = ha/mc$), sobre este término tiene influencia la naturaleza del fluido y T_0 .

Al resolver la ecuación diferencial (2.4) para un cuerpo que se enfría desde una temperatura T hasta una temperatura T_0 , obtenemos una relación de la temperatura del cuerpo en función del tiempo, es decir:

$$T(t) = e^{-kt} C_1 + T_a \quad (2.5)$$

donde C_1 es la constante de integración, es decir, $C_1 = T_0 - Ta$.

Si ahora, por algún medio se le suministra energía al cuerpo, la ecuación (2.4) deberá ser modificada (2.6); teniendo presente que para obtener la solución de esta nueva expresión, el suministro será considerado como no dependiente del tiempo, es decir, la potencia (P) es constante al igual que la temperatura ambiente (T_0).

$$\frac{dQ}{dt} = -k(T - T_0) + P \quad (2.6)$$

se reescribe como:

$$W \frac{d(T - T_0)}{dt} = -k(T - T_0) + P \quad (2.7)$$

con $W = c_p m$, lo que da el siguiente resultado:

$$W \frac{d(T - T_0)}{dt} = -k \left((T - T_0) - \frac{P}{k} \right) \quad (2.8)$$

usando separación de variables obtenemos:

$$\frac{d(T - T_0)}{(T - T_0) - \frac{P}{k}} = \left(\frac{-k}{W} \right) dt \quad (2.9)$$

procedemos a integrar

$$\int \frac{d(T - T_0)}{(T - T_0) - \frac{P}{k}} = \int \left(\frac{-k}{W} \right) dt \quad (2.10)$$

Al resolver ambos lados de la ecuación (2.10), se tiene que:

$$\text{Ln} \left| (T - T_0) - \frac{P}{k} \right| = \left(\frac{-k}{W} \right) t + C \quad (2.11)$$

$$(T - T_0) - \frac{P}{k} = e^{\frac{-k}{W}(t)+C} \quad (2.12)$$

de esta última despejamos T

$$T = T_0 + \frac{P}{k} + C e^{\frac{-k}{W}t} \quad (2.13)$$

si a un $t=0$ y $T = T_0$, se tiene una ecuación para determinar la constante C

$$T_0 = T_0 + \frac{P}{k} + C \quad (2.14)$$

Al desarrollar las ecuaciones que representan los cambios de temperatura en el absorbedor, se ha valorado a la potencia involucrada en el proceso como constante, durante un intervalo de tiempo. En este intervalo la potencia presenta un comportamiento similar a como lo haría si esta fuera constante. Hacemos uso de esta suposición para encontrar el parámetro de enfriamiento y la irradiancia efectiva.

Con la ecuación (2.14), se obtuvo un valor de $C = \frac{-P}{k}$. Por lo tanto la solución de la ecuación (2.7) es:

$$T = T_0 + \frac{P}{k}(1 - e^{-\frac{k}{W}t}) \quad (2.15)$$

Ahora bien si se interrumpe el suministro de energía; en nuestro caso -por ejemplo, durante la noche- se irá perdiendo gradualmente el calor y por tanto disminuirán la temperatura y presión en el interior del absorbedor.

Al tiempo t_1 , cuando al valor de $T = T_1$ (tiempo de la interrupción de energía), la ec.(2.7) se transformará en:

$$W \frac{d(T - T_0)}{dt} + k(T - T_0) = 0 \quad (2.16)$$

cuya solución será de la forma:

$$T = T_0 + (T_1 - T_0)e^{-\frac{k(t-t_1)}{W}} \quad (2.17)$$

Las ecuaciones (2.13) y (2.17) constituyen las bases para los cálculos que exige el método empleado.

Como ya se describió anteriormente los mecanismos de transferencia de calor estarán presentes durante y después de exponer al colector a un suministro de energía, en nuestro caso este suministro era proporcionado por el sol. Para conocer la evolución de la transferencia de calor dentro del tubo absorbedor a lo largo de varios días se realizaron mediciones de dos de las variables termodinámicas (presión y temperatura).

Las diferentes pruebas experimentales para el estudio del colector prototipo, fueron realizadas en la azotea del edificio Tlahuizcalpan de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Con una orientación este-oeste y una inclinación de 30° , nuestro colector podía estar en uso durante un periodo de tiempo sin necesidad de ajustar dicha orientación.

A lo largo de tres días se llevó a cabo una de las primeras pruebas experimentales, la cual inició a las 12:00 pm del 18 de Enero del 2010, con 1380 ml de agua en el absorbedor y finalizando el 21 del mismo mes. Antes de analizar los registros fue necesario hacer una conversión de los datos registrados, pues estos se acumulan en señales de voltaje, siendo necesario aplicar las relaciones de calibración respectivas para cada uno de los sensores involucrados en la adquisición (sección 3.3). Para tener un manejo más automatizado de la conversión y manejo de los datos, se crearon diferentes programas que facilitaron el análisis de las muestras almacenadas, en cada uno de los experimentos realizados.

El comportamiento registrado por el PT-100 en función del tiempo durante esta medición continua, presentó incrementos graduales alcanzando temperaturas entre los 110 a los 125 $^\circ C$, lo que ya se puede considerar como una medida de eficiencia de nuestro colector solar prototipo.

Los valores de temperatura alcanzados corresponden a un balance entre el aporte de energía que recibió el colector (radiación solar) y las pérdidas debidas a las condiciones de nuestro sistema, pues este último adquiere en algún momento en el que se hizo el registro, una temperatura más alta que el medio en el que se encontraba (interior del colector).

En la figura (2.2) presento los datos medidos experimentalmente de la temperatura, correspondientes a un intervalo en donde el calentamiento de nuestro dispositivo aumentaba, es decir observamos un comportamiento de crecimiento

Al ajustar estos resultados experimentales y conociendo los datos de la fuente de energía

(registros de irradiancia) se puede establecer el parámetro de enfriamiento o conductividad térmica de nuestro colector (k).

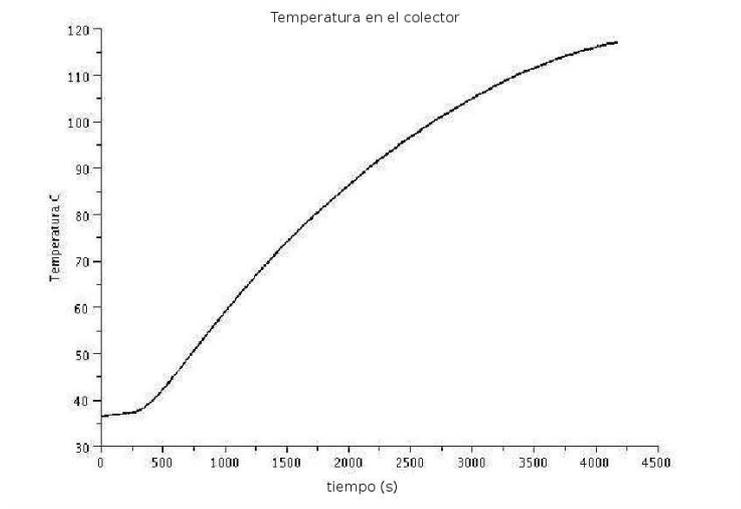


Figura 2.2: Temperatura del tubo colector en función del tiempo.

Sin embargo, no es posible ajustar analíticamente una función de la forma (2.15), pues los valores de la irradiancia efectiva (P) y la constante (k) son datos desconocidos. Para ajustarlos se hizo numéricamente mediante el método de mínimos cuadrados, el cual es una técnica donde se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos, al minimizar la suma (S) de los cuadrados de las diferencias entre los puntos generados de una función y los correspondientes en los datos. Para realizar el ajuste se diseñó un programa en fortran con las características antes mencionadas.

$$S = \sum_i (T_i(t_i) - T(t_i))^2 \quad (2.18)$$

donde $T(t_i)$ son los valores de la función propuesta para cada t_i y T_i son los datos experimentales de la temperatura para cada tiempo t_i . Por lo tanto, se encontró que la función es:

$$\sum \epsilon_i^2 = \sum \left[T_i - T_0 + \frac{P}{K} \left(1 - e^{-\frac{Kt}{W}} \right) \right]^2 \quad (2.19)$$

Con lo anterior, obtuvimos que los valores de los parámetros, que le corresponderán a nuestro colector, de la constante de proporcionalidad y la potencia son respectivamente 2.09 J/sK y 250 J/s.

Si durante el registro de la temperatura de los 5276 segundos, considero que la potencia se mantuvo constante, la solución representativa de este comportamiento está dada por la ecuación (2.15), la cual también la podemos expresar como:

$$T - T_0 = \frac{P}{k} \left(1 - e^{-\frac{k}{W}t} \right) \quad (2.20)$$

A tiempos muy grandes se puede ver que la solución dada por la ecuación (2.15), queda representada como:

$$T_M - T_0 = \frac{P}{k} \quad (2.21)$$

donde T_M , es la temperatura máxima del colector.

Cuando se inició la adquisición de datos continua, se registró una temperatura ambiente de 20 °C, con esto nuestra temperatura máxima que tenemos con respecto a la irradiancia efectiva y al parámetro de enfriamiento es de 139.61 °C. Es importante que recordemos que todo esto es considerando a una potencia constante.

2.2. Estado estacionario por el balance de pérdidas de energía por transferencia de calor y energía proporcionada por el Sol

El balance térmico de un colector solar dependerá del equilibrio entre la cantidad de energía (pérdidas y ganancias) y de los diferentes mecanismos de transmisión del calor. El almacenamiento de energía solar se puede hacer:

- En forma de calor sensible, en el que el calor almacenado aumenta la temperatura de un medio líquido, sólido o gaseoso; sin afectar su estructura molecular.
- En forma de calor latente, como el calor de fusión en sistemas químicos.
- En forma de calor sensible y latente, en el que el calor almacenado implica una variación de temperatura y un cambio de estado del sistema receptor (sólido y líquido); la restitución del calor corresponderá al cambio de estado inverso.
- En forma de energía química originada en reacciones químicas.

La cantidad de calor que hay que proporcionarle a un cuerpo para que su temperatura aumente en un número de unidades determinado es tanto mayor cuando más elevada sea la cantidad de masa de dicho cuerpo, siendo proporcional al calor específico de la sustancia que está constituido¹, esto cuando no hay transiciones de fase.

Para el calentamiento de agua dentro del tubo absorbedor de nuestro colector prototipo, el almacenamiento se dará en forma de calor sensible y latente, siendo con esto la energía almacenada igual al cambio de energía interna que sufre el agua en función de la temperatura y de su calor específico.

Las sustancias con un calor específico elevado varían muy poco su temperatura, esto si se les aplica o se les quita calor, entre los materiales líquidos más adecuados; los cuales citaré en orden ascendente son: el agua, los aceites naturales o sintéticos, las sales fundidas y los metales líquidos.

Dentro de las desventajas que puede tener el agua al ser utilizada como sustancia de

¹Se define al calor específico de una sustancia, como la cantidad de calor, en calorías, que hay que suministrarle para que su temperatura se eleve un grado; siendo una propiedad física de cada material

almacenamiento, es la necesidad de el uso de depósitos por lo general grandes y caros, los cuales se pueden oxidar si son de metal o presentar grandes pérdidas de calor por conducción y convección, aunque para evitarlas se pueden utilizar aislantes.

En el proceso de aprovechamiento térmico de la radiación solar, la energía proporcionada en cualquier región del planeta, varía con la hora del día, con la estación del año y con la latitud. Estas diferencias de radiación disponible originan los cambios en la temperatura ambiente ², que influirán en el comportamiento de nuestro colector solar.

Un modelo sencillo, pero que se ajusta bien a observaciones experimentales, se logra considerando que la temperatura ambiente evoluciona de forma parecida a como lo hace la radiación solar, aunque con un retraso de dos horas [Iqbal,1983].

El modelo utilizado para describir la variación de la temperatura ambiente (T_a) a lo largo de un día a partir de la temperatura máxima y mínima de ese día supone que:

- La temperatura ambiente máxima (T_{aM}), se produce siempre dos horas después del mediodía solar ($\omega = \pi/6$).
- La temperatura ambiente mínima (T_{am}), se produce siempre al amanecer ($\omega = \omega_s$). Donde ω es el ángulo horario de la salida del sol.
- Entre estos dos instantes, la temperatura ambiente evoluciona de acuerdo a dos semiciclos de dos funciones coseno, en función del tiempo solar (ω).

Un conjunto de ecuaciones acorde con estos supuestos, que permiten calcular la temperatura ambiente para cualquier hora del día son:

- Para $-\pi < \omega < \omega_s$

$$T_a = T_{aM} - \frac{T_{aM} - T_{am}}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (2.22)$$

en donde $a = \frac{\pi}{\frac{\pi}{6} - \omega_s - 2\pi}$ y $b = (-a)\omega_s$.

- Para $\omega_s < \omega < \pi/6$

$$T_a = T_{am} - \frac{T_{aM} - T_{am}}{2} [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (2.23)$$

en donde $a = \frac{\pi}{\omega_s - \frac{\pi}{6}}$ y $b = -\frac{a(\pi)}{6}$.

- Para $\pi/6 < \omega < \pi$

$$T_a = T_{aM} - \frac{T_{aM} - T_{am}}{2} x [1 + \cos(a\omega + b)] \quad (2.24)$$

en donde $a = \frac{\pi}{2\pi + \omega_s - \frac{\pi}{6}}$ y $b = -\left(\pi + \frac{a(\pi)}{6}\right)$.

²Es la temperatura del aire registrada en el instante de la lectura

Este procedimiento se usará para calcular la evolución temporal de temperatura ambiente para el día representativo de cada mes, a intervalos de diez minutos, a partir de la temperatura máxima y mínima del día representativo las cuales se suponen coincidentes con el valor medio mensual de las temperaturas máxima y mínima correspondiente a ese mes.

Por lo tanto, la temperatura máxima registrada en un día, se dió entre la 14:00 y las 16:00 horas. Mientras que la temperatura mínima registrada en un día, se puede observar entre las 06:00 y las 08:00 horas.

Cuando definimos un sistema termodinámico, establecemos para él un contorno o límites, que separan del medio circundante a nuestro cuerpo de estudio. El sistema puede encerrar un sólido, un líquido, un gas, energía radiante e incluso una mezcla de éstos. Existen en la naturaleza tres tipos de sistemas termodinámicos:

- Sistemas aislados, que no intercambian materia ni energía con el medio circundante.
- Sistemas cerrados, que intercambian energía pero no materia con el medio circundante.
- Sistemas abiertos, que intercambian materia y energía con el medio circundante.

La termodinámica clásica compara estados de equilibrio y a partir de estos se puede inferir información acerca de los procesos. A cualquier transformación en un sistema, desde un estado inicial a otro final, por una trayectoria definida, se conoce como proceso.

Un sistema que está en equilibrio térmico, puede alcanzar la condición de estado estable, cuando no se tiene intercambio neto de energía entre cualquiera de las partes del mismo, ni de sus temperaturas, ya que estas llegarían a ser idénticas (temperatura final de equilibrio).

Cuando un sistema abierto, como es el caso de nuestro colector, alcanza el estado estacionario las magnitudes del sistema son constantes con respecto al tiempo; volviéndose importantes las tasas de disipación de calor y de energía libre y de trabajo realizado para mantener dicho estado estacionario.

Estas mismas características pueden verificarse en sistemas en equilibrio, sin embargo, no deben confundirse ambos tipos de situaciones ya que en los sistemas en equilibrio los flujos que se intercambian son iguales a cero, lo mismo que la producción de entalpía; mientras que en los sistemas de estado estacionario de no-equilibrio la magnitud, en nuestro caso (unicamente energía) tiene valores constantes, distintos de cero.

2.3. Medición de la curva de saturación del agua

Las propiedades físicas que describen los estados de equilibrio de un sistema termodinámico se conocen como variables de estado. El estado de un sistema queda determinado por los valores de magnitudes macroscópicas medibles experimentalmente.

Se define a una sustancia pura como aquella que es uniforme e invariante en su composición química, presentándose en forma sólida, líquida o gaseosa, en estado de equilibrio como mezcla de dos cualquiera de ellas o mezcla de las tres.

En una sustancia pura y compresible las variables típicas que ilustran de una manera

sencilla los cambios de fase son: la presión, el volumen y temperatura. Para describir una transición de fase de una sustancia pura, sólo se requerirán dos variables de estado; la relación funcional entre estas (ecuación de estado) determina completamente el comportamiento termodinámico del sistema.

En la figura 2.3, A representa el estado inicial, B el estado del líquido saturado a 100 °C y a una atmósfera de presión; la línea AB es el proceso durante el cual se calienta el líquido desde la temperatura inicial a la de saturación, la línea BC es el proceso a temperatura constante, en el cual tiene lugar el cambio de fase de líquido a vapor (mezcla saturada líquido-vapor, la fase líquida y de vapor están en equilibrio), la línea CD representa el proceso en el cual se sobrecalienta el vapor a presión constante, la temperatura y el volumen aumentan en este proceso.

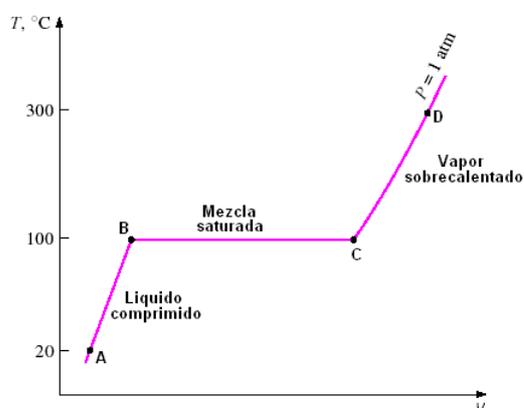


Figura 2.3: Gráfica de la temperatura vs volumen específico.

Durante un proceso de cambio de fase resulta claro que la temperatura y la presión son propiedades dependientes y que hay una relación definida entre ellas $T_{sat} = f(P_{sat})$ ¹. Para una presión dada, la temperatura de saturación es la temperatura máxima que puede tener un líquido y la temperatura mínima que puede tener un vapor. La temperatura de saturación de un fluido dependerá de la presión de este, de tal manera que al aumentar la presión se eleva el valor de la temperatura de saturación, mientras que al reducir la presión bajará la temperatura de saturación. Cualquier intento para elevar la temperatura de un líquido arriba de la temperatura de saturación traerá como consecuencia la vaporización de una parte del líquido.

El calor latente necesario para vaporizar la parte del líquido que instantáneamente pasa a estado de vapor es suministrado por la masa del líquido, reduciendo así la nueva temperatura de saturación. Se vaporizará suficiente líquido para proporcionar la cantidad de enfriamiento necesario.

Cuando un vapor es confinado en un depósito o se ve impedido su escape del recipiente en el que está contenido, con una parte de su propio líquido, tanto el vapor como el líquido

¹El término temperatura de saturación (T_{sat}) designa la temperatura a la que el cambio de fase (se efectúa la vaporización) tiene lugar para una presión determinada, llamada presión de saturación (P_{sat}) de dicha temperatura. En el diagrama de fases, para cada presión de saturación hay una única temperatura de saturación, y viceversa.

estarán saturados. Por el momento, se crea un desequilibrio ya que el vapor no saldrá del depósito en la misma proporción en que está siendo generado por la vaporización del líquido. Como consecuencia, el número de moléculas de vapor que se tiene en el espacio arriba del líquido será mayor, con lo que se incrementará la densidad y la presión del vapor que se tiene por encima del líquido, aumentando la cantidad de gotas las cuales regresaran al líquido. Esto sucederá hasta que se tenga una situación de equilibrio, el vapor quedara saturado y no ocurrirá más evaporación.

La energía del líquido aumentará con las moléculas de vapor que regresan al mismo y en una cantidad exactamente igual, basandose en la disminución de energía debido a las moléculas que salen del líquido.

Una gráfica de T_{sat} en función de P_{sat} , se conoce como curva de saturación líquido-vapor (figura 2.4), ya que la región de saturación toma la forma de una curva, la cual es característica de todas las sustancias puras.

En estas gráficas podemos observar que la temperatura de saturación se incrementa con la presión de saturación, y como consecuencia una sustancia a mayor presión hervirá a temperaturas más altas.

En un ambiente saturado las velocidades de evaporación (tasa de moléculas que se separan de la fase líquida y se integran al vapor por unidad de tiempo) y de la condensación (tasa correspondiente al proceso inverso), son iguales. En otras palabras, el sistema está en equilibrio en cualquier estado de la zona de saturación.

El estudio de las curvas de saturación es importante no solo para aplicaciones técnicas, como es el caso de los refrigerantes (refrigeración), sino también para explicar diversos fenómenos atmosféricos como la formación de nubes en aire húmedo sobresaturado.

Las relaciones de presión y temperatura, se pueden graficar a escalas normales o escalas logarítmicas. Estas últimas proporcionan una lectura con razonable precisión, tanto en bajas como en altas presiones. Siendo muy valiosas, para dar una imagen global de las relaciones de presión y temperatura de saturación, pero dependiendo del tamaño de la escala, va a ser la precisión de la lectura de los valores.

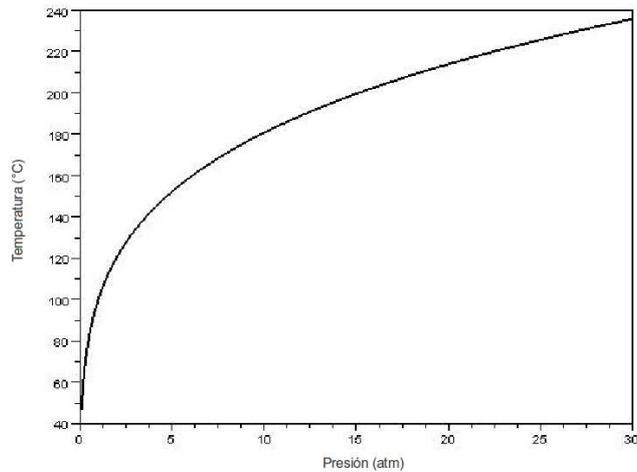


Figura 2.4: Curva de saturación del agua [Troughlike Nonimaging Solar, 2002].

De los primeros registros hechos con nuestro colector solar, no solamente se contaba con la temperatura y el tiempo de adquisición, sino también con los proporcionados por el P-51 (presión); con estos fue posible construir la curva termodinámica del agua contenida en el absorbedor del colector solar (figura 2.5). Los datos que alcanzaron las variables termodinámicas, estuvieron en un rango de 2.15 atm y 120 °C respectivamente.

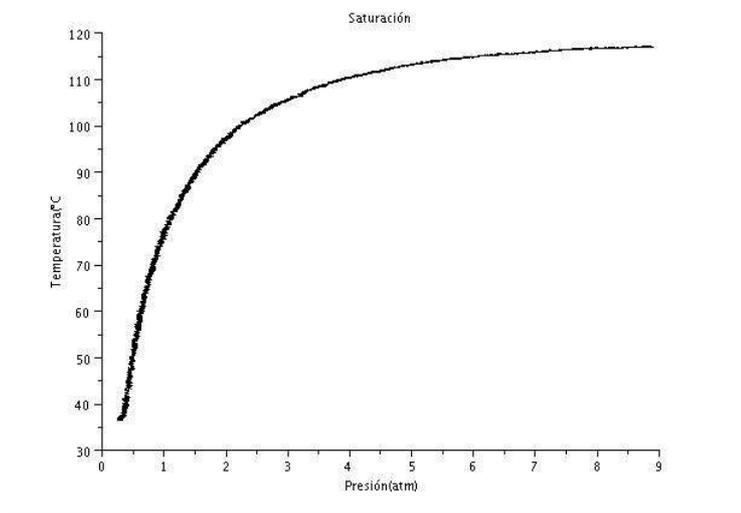


Figura 2.5: Curva de saturación del agua en el colector que relaciona la temperatura con la presión. En el experimento no se evaluó el aire.

La pendiente de la curva de evaporación es positiva (para cualquier sustancia pura comprensible), lo que significa que la temperatura a la cual el líquido alcanza la ebullición, aumenta al incrementarse la presión. Los resultados que presentamos, los podemos

comparar con la curva de saturación del agua (figura 2.4), puesto que estos describen la ecuación empírica que calcula las propiedades de la mezcla (vapor-líquido en equilibrio). Con relación a las primeras mediciones realizadas es importante mencionar que, no se tomó en cuenta la cantidad de aire que había inicialmente en el tubo absorbedor, al momento de que éste fuera llenado con agua (1380 ml) y posteriormente sellado por cada uno de los extremos del mismo, con los respectivos sensores.

También logramos comprobar que durante todo el transcurso de la adquisición de datos no se presentaron fugas en alguno de los extremos del tubo absorbedor, pues al medir la cantidad de agua al concluir con nuestro registro, esta era la misma con la que habíamos iniciado.

2.4. Simulación numérica de calentamiento de agua

En principio es posible conseguir soluciones analíticas de problemas físicos, ocurriendo en algunos casos que la mecánica que se deba utilizar para obtener dicha solución, sea más complicada, que simplemente resolver el problema numéricamente.

La dinámica de sistemas, puede ser estudiada de muchas formas, mediante modelos matemáticos con diferentes niveles de aproximación al sistema real, que permitan la simulación del comportamiento del sistema con todo tipo de condiciones iniciales.

Los modelos matemáticos dependerán de un determinado número de parámetros físicos, los cuales pueden ser mayores a medida que el modelo, requiera de una mayor exactitud. Los parámetros requeridos se pueden estimar en una primera fase de diseño o medidos directamente, si se cuenta con un prototipo real del sistema a estudiar (siendo este último nuestro caso).

Por lo tanto, al momento de aplicar el modelo teórico, este ya debe de contar con todos los parámetros y las consideraciones correspondientes para reproducir lo más exactamente posible los resultados que se obtendrían en un sistema real. Cuanto más preciso sea el modelo experimental mayor exactitud se podrá obtener al momento de hacer el análisis de resultados.

Con los balances de energía que intervienen en nuestro colector solar, se cuenta con una expresión (ecuación 2.7), a partir de la cual desarrollamos la simulación numérica del calentamiento de agua que se produce en nuestro colector solar prototipo.

La ecuación fue dispuesta para obtener su solución, mediante la cantidad de energía que se pudiera absorber del medio (selección de datos meteorológicos), que nos generarán valores de temperaturas, en cada parte del tubo colector a un tiempo dado, el desarrollo fue el siguiente: Si $\theta = T - T_0$, la ecuación (2.7), se transforma en:

$$W \frac{d\theta}{dt} = -k\theta + P \quad (2.25)$$

para integrar la ecuación diferencial, usamos el método de Euler, con el cual se aproximó la derivada por cociente de diferencias

$$W \frac{\theta(t + \Delta t) - \theta(t)}{\Delta t} = -k\theta(t) + P(t) \quad (2.26)$$

$$\theta(t + \Delta t) = \theta(t) - \frac{k}{W}(\theta(t))\Delta t + \frac{P(t)}{W}(\Delta t) \quad (2.27)$$

o en términos de la variable original.

$$T(t + \Delta t) = T(t) + [-k(T(t) - T_0) + P(t)] \frac{\Delta t}{W} \quad (2.28)$$

Con la ecuación (2.28), se obtiene la temperatura como función del tiempo. Los datos que establecimos, para modelar numéricamente nuestro dispositivo fueron:

- La temperatura inicial de 26 °C.
- La constante de enfriamiento ($k = 2,09 \text{ J/sK}$).
- Diferentes valores de irradiancia, para cada uno de los registros se tomo encuentra el factor de pérdida (0.7697).
- $W = mc_p$.

Para el caso de (W), fue tomado encuentra para el agua como para el tubo.

$$W = W_{agua} + W_{tubo}$$

$$W = (1,43g)(4186 \frac{cal}{gK}) + (2,667g)(0,11 \frac{cal}{gK})$$

$$W = 5986,27 \frac{cal}{gK}$$

Para llevar a cabo simulaciones térmicas de las instalaciones solares, lo más conveniente es poder contar con datos de radiación total para cada hora del día, denominada irradiación horaria (MJ/m^2), o por separado para cada día del año.

El intervalo de tiempo que se eligió para las simulaciones que se realizaron fue de todo un día. Hasta ahora habíamos tomado sólo valores de irradiancia en función de intervalos de tiempo, como lo fue el análisis del comportamiento anual, para la determinación de las dimensiones del área de abertura del colector. Sin embargo, el estudio que se está realizando en este apartado, requiere mayor precisión en los datos.

De acuerdo con la distinción anterior, se trabajó con los registros completos de irradiancia del 2009, para nuestro análisis del comportamiento del absorbedor se hizo una selección de los días del mes de mayo, entre días claros, nublados e intermedios que hubo en ese mes.

La selección de los días se realizó en base a la observación de irradiancia horaria. Este proceso no se llevó a cabo con algún tipo de algoritmo automatizado de detección, sino que los días fueron seleccionados mediante el análisis visual de la evolución diaria de las gráficas de irradiancia.

Es claro que no es la manera más óptima de llevar adelante la selección, pero para una primera etapa de estudio se considera suficiente.

Entre la clasificación de los datos de irradiancia, se inicio con la elección de un día claro, en nuestro caso esa cualidad la presentó el 01 de mayo; que al incluir la irradiancia adquirida

durante este día, obtuvimos numéricamente la temperatura que llegaría a alcanzarse en el interior el tubo absorbedor. Los resultados de este primer registró numérico se muestran en la figura 2.6.

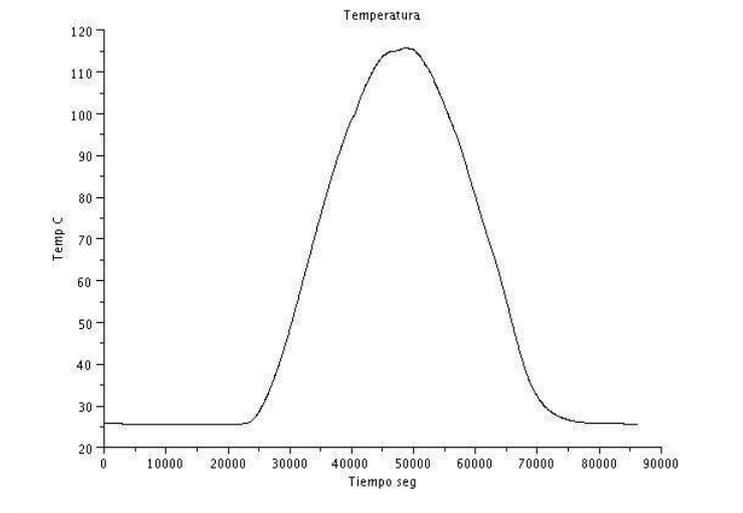


Figura 2.6: Temperatura obtenida de la simulación, a partir de los datos de irradiancia de un día claro.

Como se puede observar el absorbedor alcanzaría temperaturas superiores a los 110°C , lo cual también ocurriría en un día nublado, pero con la diferencia de que el aumento en la temperatura no sería tan continuo y mostraría un rápido decaimiento, esto en comparación al mostrado anteriormente para un día sin la presencia prolongada de nubes. Esta última afirmación, se observa en la figura (2.7); los datos fueron obtenidos con las mismas condiciones de la primera modelación, pero ahora para un día nublado, en este caso el 11 de mayo.

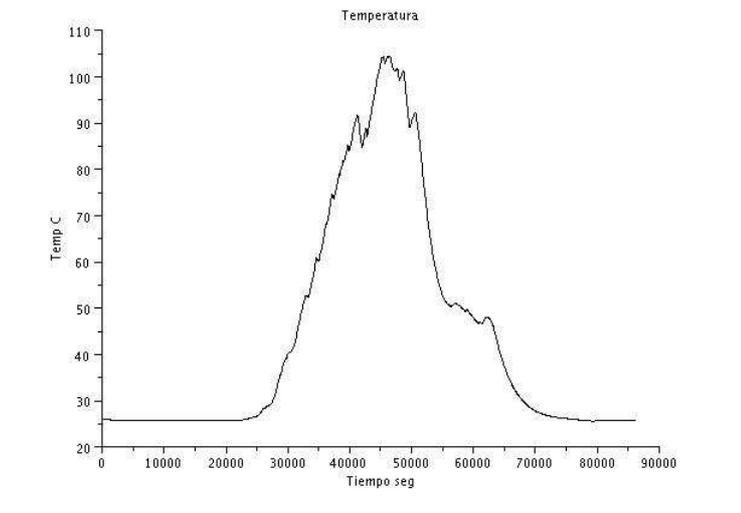


Figura 2.7: Temperatura obtenida de la simulación, a partir de los datos de irradiancia de un día nublado.

A continuación se tiene la modelación del día 26 de mayo siendo este intermitente, es decir, que tuvo partes con presencia de cielo limpio y el resto con exceso de nubes (2.8); observamos que aun con estas cualidades el absorbedor alcanzaría temperaturas superiores a los $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ pero con menor frecuencia que en un día claro, esto sobre todo a la mitad de los resultados de la simulación se tiene el decaimiento.

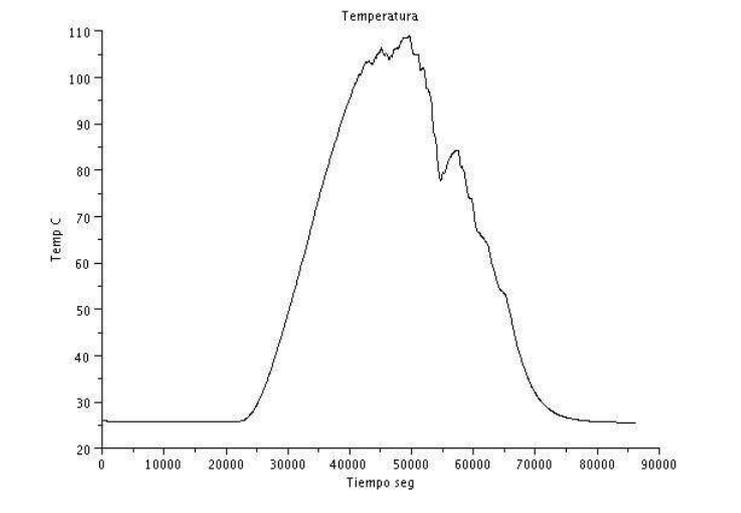


Figura 2.8: Temperatura obtenida de la simulación, a partir de los datos de irradiancia de un día intermitente.

También estudiamos el comportamiento de un día, en el cual la presencia de irradiancia fue muy escasa, siendo el caso del 30 de mayo figura (2.9), en esta podemos observar la

presencia de excasas temperaturas altas que en grafica muestran poca suavidad.

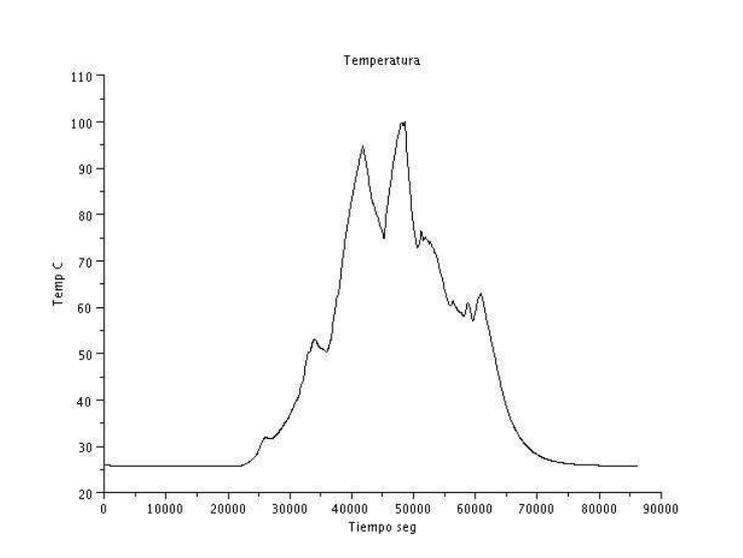


Figura 2.9: Temperatura obtenida de la simulación, a partir de los datos de irradiancia de un día extremadamente nublado.

Capítulo 3

Dispositivo experimental

Para desarrollar el trabajo que aquí se reporta, fue necesario disponer de aparatos que permitieran valorar simultáneamente la presión y la temperatura así como de un sistema de adquisición de datos por computadora para almacenar las mediciones de estas variables.

Para estudiar los procesos de transferencia de calor dentro de nuestro colector, utilizamos dos tipos de sensores: *Transductores piezoeléctricos* para medir presión y *Sondas* de platino para medir temperatura.

Un *Captor* o *Sensor* es, en sentido estricto, un elemento que detecta una determinada magnitud física y la convierte en variaciones de otra magnitud física. Por otro lado, un transductor detecta y convierte una magnitud física en una señal (generalmente eléctrica) que pueda ser interpretada por un sistema de control. Existen dos tipos de transductores: *Pasivo*, el cual se alimenta de una fuente de poder que no es la del mismo proceso que está midiendo y el *Activo* que necesita menos energía del propio proceso a medir, ya que tiene para su funcionamiento una fuerza externa.

3.1. Principio de operación de transductores piezoeléctricos

En 1880, Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal se redistribuyen las cargas eléctricas de éste; ellos llamaron a este fenómeno el *Efecto Piezoeléctrico*.

Los materiales piezoeléctricos muestran altas estabilidades física y térmica y se manufacturan en diferentes formas y en un gran intervalo de valores para las propiedades de interés (*Constante Dieléctrica*, *Coeficiente Piezoeléctrico*, *Temperatura de Curie*¹).

Entre sus desventajas se encuentra la sensibilidad a la temperatura, la susceptibilidad al envejecimiento (pérdida de propiedades piezoeléctricas) y la propensión a sufrir daños físicos irreversibles si se les somete a temperaturas cercanas a su temperatura de Curie. También son dispositivos de alta impedancia, teniendo como consecuencia que sólo puedan suministrar corrientes muy pequeñas.

¹En los materiales paramagnéticos la susceptibilidad magnética es inversamente proporcional a la temperatura absoluta según la ley de Curie

Actualmente, el efecto piezoeléctrico se encuentra en la vida diaria. Por ejemplo, en los encendedores de gas para cigarrillos o en los encendedores para estufas de gas, relojes con alarma, transmisores y receptores ultrasónicos, sensores de temperatura, acelerómetros, sensores de presión, sensores de fuerza, micrófonos y altavoces. Los cristales piezoeléctricos se usan como transductores debido a que el efecto piezoeléctrico posibilita la transformación de energía mecánica en eléctrica o viceversa.

El efecto piezoeléctrico es un fenómeno físico que consiste en la aparición de polarización eléctrica en un material, cuando a este se le aplica una fuerza externa (deformación mecánica). Con la polarización se produce un campo eléctrico en el material, ocasionando la aparición de una diferencia de potencial entre las caras perpendiculares a la que se coloque el campo. Este efecto es reversible: al administrarle una diferencia de potencial entre dos de las paredes del material piezoeléctrico, éste se deforma (figura 3.1).

La piezoelectricidad puede producirse en diferentes sustancias cristalinas como el bario, el cuarzo, el titanio o la turmalina pues cuentan con una celda unitaria asimétrica² que al comprimir el cristal permite el desplazamiento de los iones de cada una de sus celdas, generándose una polarización eléctrica debida a la regularidad de la estructura cristalina. Con ello, se produce una diferencia de potencial.

Una región de dipolos eléctricos con orientación se llama *Dominio*. A los grupos de dipolos con orientación paralela se les llama *Dominio de Weiss*. El dominio de Weiss está orientado aleatoriamente en el grueso del material antes de que el tratamiento de polarización sea efectuado. Para este propósito se aplica un campo eléctrico, al *Piezo Cerámico*³ (calentado). Con el campo aplicado, el material se expande a lo largo del eje del campo y se contrae perpendicularmente a este eje. Los dipolos eléctricos se alinean y permanecen rígidamente alineados hasta su enfriamiento. El material ahora tiene una polarización permanente (la cual puede ser degradada si se exceden los límites mecánicos térmicos y eléctricos del material). Como resultado, hay una distorsión que causa un aumento en las dimensiones alineadas con el campo y una contracción en los ejes normales al campo [Gutschi 2002].

Cuando un voltaje es aplicado a un material piezoeléctrico, el dominio de Weiss aumenta su alineamiento proporcionalmente al voltaje; el resultado es un cambio en las dimensiones (expansión o contracción).

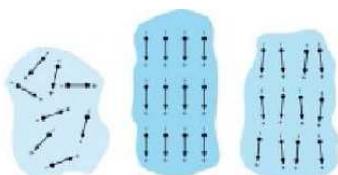


Figura 3.1: Dipolo eléctrico en el dominio de Weiss (de izquierda a derecha) cerámico ferroeléctrico sin polarizar, durante y después de la polarización (cerámicos piezoeléctrico).

Los transductores deberán de producir una fuerza electromotriz proporcional a la compresión soportada por el dispositivo. Para que esto ocurra, se utilizan encapsulamientos

²La celda unitaria es el poliedro mas simple que compone la estructura de un cristal

³Materiales sólidos inorgánicos no metálicos. Comparados con los metales y plásticos duros, no combustibles y no sufren oxidación. Están constituidos por elementos metálicos y no metálicos.

lo suficientemente rígidos que mantendrán la dureza del cristal ya que al comprimir el material piezoeléctrico se genera una carga inducida en la superficie que origina la tensión de salida, que al cabo de cierto tiempo ir disminuyendo, dando como resultado una tensión en función del tiempo, es decir, un comportamiento exponencial. (figura 3.2).

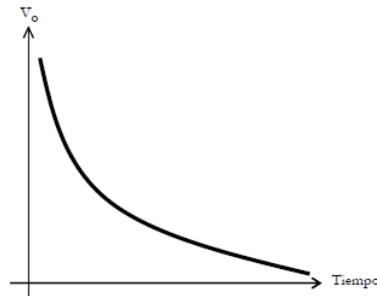


Figura 3.2: Tensión de la salida en función del tiempo para un transductor piezoeléctrico.

En la actualidad, se cuenta con materiales sintéticos para generar piezoelectricidad como son los polímeros o cerámicos ferroeléctricos policristalinos, por ejemplo el zirconato titanato de plomo, disponible en muchas variaciones, es uno de los materiales más ampliamente usados hoy para aplicaciones como actuadores o sensores. Varios tipos de transductores usan estos materiales como elemento primario, los cuales convierten una magnitud en otra que resulte mas apta para el análisis de un fenómeno físico en la toma de mediciones dinámicas [Gutsch 2002] .

Este tipo de sistemas entrega una señal de salida proporcional a la presión, muy lineal, de gran precisión, sensibilidad y exactitud, además de una muy baja dependencia de la temperatura.

Características más generales de los sensores de efecto piezoeléctrico	
Cambio de sensibilidad de 25 a 0 25 a 50°C	±10 % en el corrimiento (Span)
Cambio de sensibilidad a 1 psi	±2.0 % en el corrimiento
Cambio de sensibilidad a 100 psi	±1.5 % en el corrimiento
Repetitividad	±0.20 % en el corrimiento
Histéresis	±0.20 % en el corrimiento
Tiempo de respuesta	1 ms
Alimentación	10 a 16 Vdc

Cuadro 3.1: Tabla sacada de [Creus, 2005].

3.2. Medición de temperatura mediante termopares y sondas de platino

3.2.1. Termopares

La obtención de temperaturas es de las medidas más frecuentes y de mayor importancia en la automatización industrial. En las instalaciones de altas temperaturas o en situaciones especiales, se emplean termopares, los cuales están basados en el paso de corriente eléctrica en un circuito formado por dos diferentes metales, en donde la unión de estos presenta un gradiente de temperatura; tales condiciones son la consecuencia de la combinación de dos efectos termoeléctricos (Peltier y Thomson).

El primer efecto se fundamenta en el calentamiento o enfriamiento de la unión entre dos metales distintos, al pasar corriente por ella. Por su parte, el efecto Thompson se caracteriza por la absorción o liberación de calor por parte de un conductor sometido a un gradiente de temperatura por el que circula una corriente.

En el mercado existen diferentes tipos de termopares, los cuales se distinguen uno de otro debido a los pares de metales con los que se fabrican sus conductores. Las especificaciones más comunes se presentan en el cuadro 3.2.

Características generales de los termopares	
Sensibilidad	6.5 - 80 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Resolución	0.5 $^\circ\text{C}$
Alimentación	AC y DC
Voltaje de salida	0 a 18.636 mV
Intervalo de medida	-40 a 1200 $^\circ\text{C}$
Intervalo de operación	no lineal $^\circ\text{C}$

Cuadro 3.2:

Entre los principales atributos que poseen los termopares se encuentran su bajo costo, rápida respuesta a cambios de temperatura y un amplio intervalo para la medición de la temperatura, mientras que dentro de sus desventajas se tiene su baja sensibilidad y que los voltajes pueden verse afectados por el ruido.

3.2.2. Sondass de platino

El detector de temperatura de resistencia, o *PT-100*, se encuentra formado de un hilo conductor adecuadamente bobinado entre capas del material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica. La denominación PT-XXX, de amplia utilización, se acredita por las iniciales de los físicos que propusieron los efectos termoeléctricos subyacentes en el funcionamiento de los termopares (mencionados anteriormente).

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado "*Coficiente de temperatura*" que expresa, a una temperatura específica, la variación de la resistencia del conductor por cada grado de temperatura. La relación entre estos factores pueden verse en la ecuación lineal 3.1:

$$R_t = R_o(1 + \alpha t) \quad (3.1)$$

en la que R_o es la resistencia (en ohmios) a 0°C , R_t resistencia (en ohmios) a la temperatura t (en $^\circ\text{C}$) y α el coeficiente de temperatura (en $\frac{1}{^\circ\text{C}}$).

La ecuación 3.1 es aceptable para variaciones pequeñas de temperatura (ver cuadro 3.3), pero si se quisieran manejar variaciones más grandes de temperatura, sería necesario agregar términos de orden superior de modo que, por lo general, una termorresistencia tendrá una resistencia que podrá aproximarse por un polinomio de grado n , donde el número de términos a usar dependerá del material, del intervalo de utilización y de la precisión requerida.

$$R_t = R_o(1 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + \dots + c_nT^n) \quad (3.2)$$

Los sensores de temperatura basados en la variación de resistencia son probablemente los más abundantes. Para su construcción se utilizan metales como platino, níquel y cobre; de estos el más económico es el níquel o aleaciones del mismo. La principal ventaja de estos metales es que su sensibilidad es unas diez veces mayor que la de los termopares. En el cuadro 3.3 se presenta una recopilación de algunas cualidades que tienen estos materiales.

Metal	Resistividad $\mu\Omega/cm$	Coeficiente de temp. $1/^\circ\text{C}$	Intervalo de temp. $^\circ\text{C}$
Platino	9.83	0.003850	-200 a 950
Níquel	6.38	0.0063 a 0.0066	-150 a 300
Cobre	1.56	0.00425	-200 a 120

Cuadro 3.3:

En comparación con el platino, el níquel, si bien es de menor precio, presenta la desventaja de la falta de linealidad, mientras que el cobre es estable, barato y bastante lineal, pero entrega una baja resistividad, obteniendo así una baja resolución de medición. En la figura 3.3 se grafica $\frac{R_t}{R_o}$ en función de la temperatura para el platino, el níquel y el cobre; la estabilidad y el margen de linealidad que presenta el platino entre los 100 y 300 $^\circ\text{C}$ es el intervalo que requerimos para el estudio termodinámico de nuestro colector. Ampliamente utilizado, la elección del platino en los detectores de temperatura, permite realizar medidas más exactas y estables hasta una temperatura de aproximadamente 500 $^\circ\text{C}$.

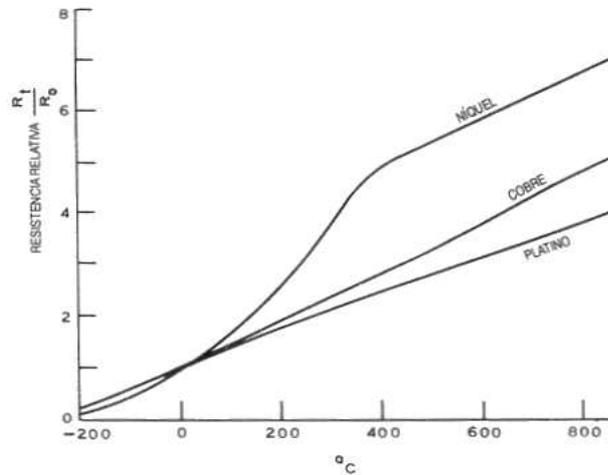


Figura 3.3: Curvas de resistencia vs. temperatura para alambres de platino, cobre y níquel. La resistencia está normalizada al valor cuando $T = 0^\circ\text{C}$.

Principales características PT-100 de platino	
Voltaje de salida	del orden de mV
Sensibilidad	$\pm 0.002 \mu\text{A}/\text{V}$
Resolución	0.01 °C

Cuadro 3.4:

La humedad es uno de los inconvenientes que en el largo plazo puede afectar el buen funcionamiento de este tipo de sensores; causando un deterioro en sus cables, permitiendo la introducción de ruido.

Otro problema que puede ocurrir es que la corriente de excitación genere, por efecto Joule, un calentamiento del elemento sensor aumentando su temperatura y produciendo un error en la lectura. Este error puede ser más pronunciado, mientras más pequeño sea el PT-100 (por su menor capacidad de disipación del calor generado).

El cambio de la resistencia del PT-100, producido por un cambio en la temperatura, puede determinarse por dos métodos indirectos, que son: medir el cambio al alimentar al sensor con una corriente conocida o medir el cambio de voltaje que aparecer en la diagonal de medida de un puente de Wheatstone; este circuito consiste de dos divisores de tensión colocados en paralelo, en una de cuyas ramas estar conectada el PT-100 (figura 3.4).

Este último método fue el que se utilizó en el PT-100, cuyas funciones consistirán también de una amplificación y un filtrado de la corrección del nivel de la señal de salida (*offset*), la señal se amplificó y se filtró.

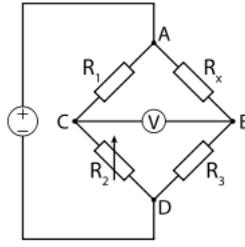


Figura 3.4: Representación del circuito del puente de Wheatstone, formado por tres resistencias, más el PT-100 y la fuente de alimentación de corriente (I).

Como se puede observar en la figura 3.4, la corriente se divide en dos trayectorias (I_a e I_b) diferentes, estableciendo un voltaje de salida (V_s) en la diagonal de la alimentación del puente.

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{V}{12000 + R_0} \\ I_b &= \frac{V}{12000 + 100}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Aplicando la ley de Ohm, se determina el valor del voltaje E_0 para las variaciones con la temperatura de la resistencia del PT-100:

$$\begin{aligned} V_a &= RI_a \\ V_b &= RI_b \end{aligned} \quad (3.4)$$

al sustituir 3.3 en 3.4 obtenemos:

$$\begin{aligned} V_a &= R \left(\frac{V}{12000 + R_T} \right) \\ V_b &= R \left(\frac{V}{12000 + 100} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$

El voltaje E_0 a la salida del puente será en todo momento igual a la diferencia de voltajes en las ramas AC y BC:

$$E_0 = V_{AC} - V_{BC} \quad (3.6)$$

al sustituir en la ecuación 3.5 en la ecuación 3.6:

$$E_0 = R \left(\frac{V}{12000 + R_T} \right) - R \left(\frac{V}{12000 + 100} \right) \quad (3.7)$$

$$E_0 = RV \left[\frac{1}{12000 + R_T} - \frac{1}{12000 + 100} \right]. \quad (3.8)$$

realizando la siguiente aproximación:

$$\frac{1}{1+x} \approx 1-x$$

tenemos que:

$$E_0 = RV \left[\frac{1}{12000} \left(1 - \left(\frac{R_T - 100}{12100} \right) - \frac{1}{12100} \right) \right] \quad (3.9)$$

reagrupando:

$$E_0 = \frac{-RV}{12100} \left[\frac{R_T - 100}{12100} \right] \quad (3.10)$$

de donde:

$$E_0 = \frac{(-12000)(12)}{12100} \left[\frac{R_T - 100}{12100} \right] \quad (3.11)$$

y finalmente:

$$E_0 = \frac{(-12)}{12100} [R_T - 100] \approx \frac{-1}{1000} [R_T - 100] \quad (3.12)$$

Por lo tanto:

$$\frac{V}{\text{ganancia}} = \frac{1}{100} [R_T - 100] \quad (3.13)$$

La señal de salida del puente, E_0 , es de una amplitud muy baja, por lo que se hace necesario amplificarla a un valor adecuado para su posterior tratamiento por el filtro. La ganancia aplicada a la señal E_0 fue de 50.

A la temperatura de 0°C¹ los voltajes de las cuatro ramas del puente de Wheastone son iguales. A lo largo del proceso de medición, la resistencia del sensor variará desequilibrando el puente de Wheastone. Por lo tanto, se generará una tensión inicial distinta de 0 V (tensión offset) produciendo una señal no nula a la salida del acondicionador (diferencia de potencial distinta de cero). Existen distintos modos en que un sistema puede manejar esta tensión inicial offset:

- Al compensar la tensión inicial offset mediante software, con ésta se tendrá una medida inicial antes de aplicar la tensión de entrada, conocida como *Autocero*. La desventaja es que no se eliminará la tensión real del puente. Si la tensión offset es lo suficientemente grande, se limitará la ganancia que el amplificador pueda aplicar a la tensión de salida, por lo tanto, limitará el rango dinámico de la medida.
- Se puede utilizar una resistencia regulable o potenciómetro para ajustar físicamente la salida del puente a 0 V. Al variar la posición del potenciómetro se puede controlar el nivel de salida del puente con un ajuste inicial de la salida a 0 V, es decir, nosotros establecemos el punto de partida.

¹valor de la resistencia del sensor PT-100 es de 100 Ω

Los acondicionamientos de señal proporcionan normalmente una fuente de tensión constante para alimentar el puente. Si bien no existe un nivel de tensión estándar, el rango al cual trabajan generalmente está entre los 3 a los 10 V. Una mayor tensión de excitación proporcionará una mayor tensión de salida, causando también mayores errores debidos al autocalentamiento (mencionados con anterioridad). Por lo tanto, esta señal durante la obtención de datos deber de ser precisa y estable.

La salida de voltaje que suministran los puentes es relativamente pequeña (mV); por tanto, es necesario incrementar el nivel de resolución de la medida y mejorar la señal-ruido, amplificando la señal de salida [Rashid 2002].

3.3. Calibración de transductores de presión y temperatura

El transductor ideal sería aquél en que la relación entre la magnitud de entrada y la magnitud de salida fuese proporcional y de respuesta instantánea e idéntica para todos los elementos de un mismo tipo.

Sin embargo, la respuesta real de los transductores nunca es del todo lineal, sino que tiene un rango limitado de validez, ya que suele estar afectada por perturbaciones del entorno exterior y tiene un cierto retardo.

La calibración se realiza con el fin de tener un parámetro de exactitud y precisión en las mediciones de temperatura y presión realizadas durante este trabajo. Cualquier sensor o transductor necesita estar calibrado para ser útil como dispositivo de medida.

La calibración de un instrumento es el conjunto de valores de la relación entre la variable de entrada (del proceso) y la variable de salida (medición), manteniéndose constantes las restantes condiciones. Por lo tanto, al modificar las condiciones experimentales, la curva de calibración puede llegar a ser diferente [Boebelin 1980].

Se considera que un instrumento, se encuentra calibrado, si en todos los puntos de su rango de medición, la diferencia entre el valor real y el que indica (registra o transmite) la variable de medición está dentro de los límites que predice la precisión del instrumento. En el campo de la industria se toma como error aceptable para la precisión de los instrumentos el parámetro de 1 % de error, mientras que en los laboratorios de instrumentación y control automático es del 0.5 % de error. En la práctica, los instrumentos poseen valores inexactos en la salida, que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada.

Los sensores de presión, al hacer uso del efecto piezoeléctrico, muestran una relación entre el cambio de corriente y el cambio en la presión. El sensor que se manejó fue el P51 para 100 psi (series MS de SSU Technologies). En el siguiente cuadro se presentan las especificaciones dadas por el fabricante, las cuales fueron tomadas en cuenta para el buen uso del mismo:

Para llevar a cabo la calibración del P-51, se utilizó una compresora en la que se midió la presión con un manómetro en condiciones estáticas, es decir, se comprimió el gas; al variar la presión se producen cambios en la corriente. La corriente generada se hace pasar por una resistencia de 100 Ω , midiendo la caída de potencial que se presenta en ésta. A partir de lo anterior, se hizo el registro de las variaciones de voltaje en el circuito

Características del P-51
<ul style="list-style-type: none"> - Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. - Su señal de respuesta es lineal a variaciones de presión. - Su precisión es del orden de $\pm 1\%$. - Están diseñados para trabajar en el rango de operación (0 a 100 psi). - Temperatura: $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. - Salida de corriente: 5 y 20 mA. - Precisan de ajustes de impedancias en caso de fuertes choques.

Cuadro 3.5:

que se muestra en la figura 3.5.

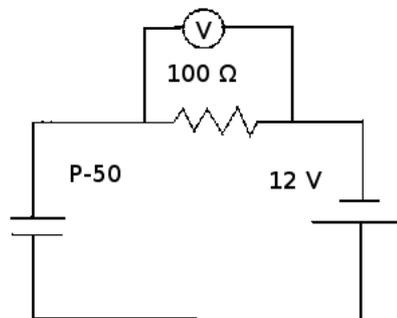


Figura 3.5: Diagrama de circuito para sensores de presión. Se ha usado una resistencia de $100\ \Omega$, lo que da salida de voltaje entre 0.5 y 2 V, que se envían directamente a la tarjeta de adquisición de datos.

Conectándole en serie una resistencia de $100\ \Omega$ al sensor de presión, convertimos la salida de este en voltaje. La resistencia al manejar corrientes a partir de los 4 mA hasta los 20 mA, con una alimentación de 10 V, llegar a producir voltajes de salida que estarán en el rango (0.4-2 V) que es capaz de medir el instrumento, para su posterior digitalización con la tarjeta de adquisición de datos.

A partir de las tablas de datos se realizó el procesamiento de la información para inicialmente verificar si el dispositivo experimental cumple con las especificaciones del fabricante. Esta verificación posibilita la determinación de la ecuación de trabajo para este sensor. La línea que une todos los puntos obtenidos es la denominada curva de calibración. Si durante la calibración se aplica varias veces la misma magnitud de entrada, sucede que la lectura de salida no siempre es la misma. Ello es debido en último término a la aleatoriedad de los diversos factores que repercuten en el valor de la salida en presencia de una entrada específica. La dispersión de las lecturas determina la denominada fidelidad o repetibilidad del sensor. Para ajustar la curva de calibración se toma el valor medio de las lecturas. Lo más frecuente, por ser lo más práctico, es ajustar una recta a través de dichos puntos, por ejemplo, con el método de los mínimos cuadrados [Gautschi, 2002]. Los ensayos de calibración correspondientes a los transductores de presión utilizados, die-

ron la siguiente ecuación de ajuste, con la que se pueden expresar las lecturas directas del sensor teniendo las siguientes unidades $\frac{V}{m^3/C}$.

$$P = \frac{V - 0.556714}{0.0143923} \quad (3.14)$$

Para efectuar las mediciones de temperatura, se trabajó con una sonda de platino. Este sensor está hecho por el fabricante, de manera que cuando se encuentre a una temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, el valor de la resistencia deber ser de $R_0 = 100\Omega$. La relación entre la temperatura y la resistencia se puede asumir lineal en un rango de temperaturas, pero hay que considerar que las desviaciones no lineales fuera de este rango pueden ser importantes. Generalmente se utiliza la expresión dada por el fabricante, en donde se relaciona la resistencia de la sonda con (3.1) la temperatura a la que está sometida, en grados centígrados. También se puede hacer una calibración independiente de la dada por el fabricante, haciendo un experimento controlado. Usando dos recipientes, uno con hielo y el otro con agua caliente, estudiaremos la constante de tiempo del sensor.

Se inició la calibración eligiendo un punto de referencia o de partida (temperatura T1). Para nuestra práctica se eligió cero grados centígrados (0 volts). Esto se logró colocando el sensor en el hielo hasta que se mantuviera estable en ese punto. Después fue necesario romper ese equilibrio colocando el sensor en el recipiente de agua caliente; se hicieron registros de los cambios de temperaturas cada 2°C . Estas mediciones también se hacen con un termopar; con esto se establecerá una relación empírica entre ambas temperaturas, para así ser comparada con la fórmula del fabricante. La representación gráfica de la tensión (voltaje de salida) como función de la temperatura medida. Mediante un ajuste en el experimento obtenemos la curva de calibración del sensor de temperatura.

Con los sensores de temperatura resistivos se aprovecha el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento en la temperatura, exista un aumento en la resistencia eléctrica. Suelen ir asociados a montajes eléctricos, como lo es el puente de Wheatstone, con un margen de corriente continua de un 1 mA, que responde a la variación de la resistencia eléctrica por efecto de la temperatura para producir una señal analógica de salida de 4 mA a 20 mA c.c; que es la que se utiliza en el sistema de control correspondiente como señal de medida, siendo esta una razón para medir la temperatura con señales de voltaje, ya que estas señales pueden utilizarse por medio de una tarjeta de adquisición para estudiar el comportamiento de la variable de estudio, la temperatura en este caso, utilizando el software de la computadora. El voltaje es lineal con la resistencia y, por lo tanto, depende también linealmente de la temperatura que queremos medir.

3.4. Características de sistemas de conversión analógico-digital

En las secciones anteriores de este capítulo se mencionaron los principios de operación y sensibilidad de los sensores y transductores que utilizamos para el estudio de las transferencias de calor de nuestro colector solar.

En esta sección hablaremos de la herramienta (tarjeta de adquisición de datos) que se empleó para el control de los registros provenientes de los sensores y las consideraciones

para realizar la adquisición de datos.

El convertidor analógico digital es el componente básico para que un ordenador pueda realizar la medida de la señal eléctrica analógica suministrada por el sensor. Esta se convierte de una señal que varía continuamente a otra que lo hace a saltos (resolución) y sólo cada cierto tiempo (muestreo), es decir, una secuencia binaria. En un convertidor digital analógico ideal, la relación entre la entrada digital (números) y la salida analógica (voltios) es lineal. La resolución es igual al incremento más pequeño que puede experimentar la señal digital que es igual al cambio de bit menos significativo.

La elección de la tarjeta de adquisiciones está determinada directamente por el proceso o aplicación que se le da la misma; para nuestro caso, requeríamos que contara con:

- 2 entradas y una salida analógica (presión/temperatura).
- Una conexión para cualquier computadora.

Estos son algunos aspectos básicos, pero también existen aspectos técnicos que se deben de tomar en cuenta, al momento de hacer la elección de una tarjeta de adquisición de datos, los cuales explicaremos brevemente a continuación:

1. Las tarjetas tienen diferentes velocidades de muestreo para la adquisición de información, siendo este aspecto dependiente de la aplicación, ya que si la señal que va a ser introducida a la computadora tiene cambios en un tiempo muy pequeño, se debe de elegir una tarjeta que cuente con la velocidad suficiente para que la señal pueda ser monitorizada y esos cambios puedan ser percibidos por la computadora. De acuerdo al Teorema de Nyquist, la frecuencia mínima de muestreo debe ser por lo menos, el doble de la frecuencia máxima de la señal analizada [Ramon 1989].

Las tarjetas de adquisición de datos comerciales se fabrican para rangos que van desde las 60 muestras por segundo (60 S/s), hasta las 2.3×10^9 muestras por segundo (2.3 GS/s). Cabe mencionar que mientras mayor sea la velocidad de muestreo, mayor será el costo del hardware.

En el caso del colector, los cambios en las variables de interés (temperatura y presión) son lentos en relación con las velocidades que actualmente manejan las tarjetas de adquisición de datos. Por ejemplo, la variación de temperatura dentro del tubo colector se hace cada 3 o 4 minutos aproximadamente (en un día soleado); de acuerdo con esto, no necesitamos de una tarjeta con alta velocidad para el monitoreo de las variables.

2. La resolución, está relacionada al hecho de que la señal analógica que se envía a la computadora es recibida en forma digital, es decir, la señal analógica será representada numéricamente; la calidad de esta representación dependerá directamente de la resolución de la tarjeta de adquisición de datos.

La señal es una función continua en el tiempo. Sin embargo, durante la digitalización, se hace una discretización en dos sentidos:

- Se tiene una serie de tiempo con N datos.
- Los valores de la señal se redondean.

El número de datos, N está relacionado con la frecuencia de muestreo, f , y el tiempo total de adquisición (t) por medio de la resolución:

$$N = tf. \quad (3.15)$$

Algunas de las tarjetas disponibles en el mercado se fabrican con resoluciones de 8, 12, 14, 16 y 24 bits. La cuadro 3.6 muestra el número de valores con que se representan el rango de las mediciones en cada una de ellas [Pallas 1993].

Bits de resolución	Número de posibles valores
8	$2^8 = 256$
12	$2^{12} = 4096$
14	$2^{14} = 16384$
16	$2^{16} = 65536$
24	$2^{24} = 16777216$

Cuadro 3.6:

Analizando el aspecto de resolución que requerimos para el colector solar, podríamos considerar que una tarjeta que tenga una resolución de 14 bits es suficiente para nuestro sistema, ya que 0.610 mV de diferencia en una señal no representará graves errores en el estudio del colector.

3. El rango es un parámetro que se refiere al mínimo y máximo valor de voltaje y/o corriente que se permite introducir a la tarjeta de adquisición de datos.
4. Los puertos de conexión mediante los cuales se pueden llevar a cabo la adquisición de los datos son: el PCI, PXI, PCMCIA, PXI, USB, FireWire y Ethernet.

Actualmente existen muchos modelos de convertidores (A/D), cuya precisión dependerá del número de bits de salida mediante los que digitalizamos la señal.

Considerando los aspectos técnicos antes mencionados, se utilizó la tarjeta de adquisición de datos NI-USB-6009, que se conecta por medio de un puerto USB, lo que le da la capacidad de trabajar tanto con una computadora de escritorio como con una portátil. Cuenta con 8 canales de entrada analógica, referidas a tierra ("single ended"), con resolución de 14 bits, 12 líneas de E/S digital, 2 salidas analógicas, un contador, un rango de muestreo de 48kS/s y un rango de entrada de 0 a 12 volts; frecuencia de muestreo de 150 Hz.

La tarjeta NI-USB-6009 es un sistema de entrada y salida para adquisición de datos y control. Es una tarjeta que no es recomendable usar industrialmente pues está diseñada para realizar experimentos y proyectos sencillos que no implican riesgos.

3.5. Programación de tarjetas de adquisición y acondicionamiento de señales

Las tarjetas de adquisición de datos permiten comunicar las señales obtenidas a través de los sensores con el ordenador, mediante el cual se puede visualizarlas en pantalla y

almacenarlas en tiempo real para su posterior análisis.

En la actualidad, la velocidad de procesamiento de una computadora personal hace despreciable la diferencia del tiempo de ejecución de un programa realizado en bajo nivel y uno en alto nivel.

Con el fin de que la computadora admita los datos de las pruebas, y nosotros podamos observar el comportamiento del colector, para programar aplicaciones en el hardware se ha empleado el Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabView), versión de la National Instruments Corporate, siendo esta el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos (NIUSB 6009).

El LabView es un sistema de programación de carácter general con una amplia biblioteca de funciones para la adquisición, control, análisis y presentación de los datos; con un ambiente de desarrollo basado en programación gráfica que usa terminología, conos e ideas del dominio y manejo científico, aunque no por eso deja de ser una herramienta fácil de utilizar.

Un programa en LabView consta de dos elementos básicos, que son el panel frontal y el diagrama de bloques. En el panel frontal se colocan los controles y pantallas del sistema mediante la selección de objetos como indicadores numéricos, medidores, termómetros, tanques y gráficas. Una vez que se ha terminado de programar, el panel frontal es el medio para que el usuario interactúe con el sistema.

Durante la programación se constituye el diagrama de bloques seleccionando objetos e interconectándolos para transferir datos entre ellos. Estos objetos incluyen funciones aritméticas, lógicas y trigonométricas, rutinas avanzadas de adquisición y análisis, operaciones entrada-salida, etc.

LabView funciona mediante un modelo de flujo de datos completamente diferente a la arquitectura lineal de los lenguajes de programas basados en las líneas de texto. Debido a que el orden de ejecución en LabView es determinado por el flujo de datos entre nodos y no por líneas secuenciales de texto, se pueden crear diagramas que ejecuten múltiples operaciones en paralelo.

Teniendo su mayor aplicación en sistemas de medición, como monitoreo de procesos y aplicaciones de control, algunos ejemplos pueden ser sistemas de monitoreo en transporte, laboratorios para clases en universidades, proceso de control industrial. Es muy utilizado en procesamientos digitales de señales (wavelets, FFT, Total Distorsin Harmonic TDH), procesamientos en tiempo real de aplicaciones, manipulación de imágenes y audio, automatización, diseño de filtros digitales y generación de señales, entre otras. Con todo lo anterior, LabView hace posible el diseño de instrumentos de medición y automatización a un menor costo y con gran flexibilidad.

Para la correcta adquisición de las señales, se requiere definir la naturaleza de estas, es decir, sus rangos y la frecuencia de muestreo. Cuando la señal ingresa a la tarjeta no se registra el valor exacto, sino que se toma el valor más próximo del conjunto obtenido, el cual se encuentra dentro del intervalo de operación. Los sistemas actuales llegan a tener resoluciones hasta de 24 bits, lo que vuelve innecesaria una amplificación previa para muchas señales pequeñas. Sin embargo, para los dispositivos de resolución menor, la amplificación sigue siendo requerida.

Es el caso del sensor de temperatura (captor piezoeléctrico), que al transformar una señal de salida de 4-20 mV, con la tarjeta de 14 bits de resolución y un intervalo de trabajo

de $[-10V,10V]$, llega a tener incrementos de 1.22 mV. Al amplificar la señal de entrada, la señal acondicionada usa más efectivamente el rango del convertidor analógico-digital, mejorando la precisión y resolución de la medición.

Es inevitable la presencia de ruido eléctrico en las señales obtenidas; es por eso que se ha empleado el filtrado eléctrico o electrónico, que es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase, y que se convierte en algo muy importante a considerar. Existen tres tipos de filtrados:

1. Filtro pasa-bajos: es una operación que teóricamente elimina de una señal las componentes de frecuencia superiores a un valor de umbral n , (frecuencia de filtrado).
2. Filtro pasa-altos: es una operación que teóricamente elimina de una señal las componentes de frecuencias inferiores a un valor de umbral n .
3. Filtro pasa-banda: es una operación que elimina de la señal las componentes de frecuencia inferiores a un valor n_1 y las componentes de frecuencia superiores a n_2 . Dicho de otra manera, un filtro pasa-banda es una composición de un filtro pasa-bajos y un filtro pasa-altos.

La señal se puede filtrar con un dispositivo electrónico o también de forma digital, es decir, aplicando esta operación luego de la toma de datos. La operación que más se usa es la del filtro pasa-bajos, puesto que las intensidades de las componentes de frecuencias altas en una señal decrecen con el crecimiento de esta, mientras que el ruido llega a ser el factor dominante, enmascarando completamente la señal. A veces, los factores que producen ruido no se pueden eliminar completamente, pero esto no es un problema si las frecuencias características de la señal y del ruido son muy distintas [Creus 2005].

La elección de la frecuencia de muestreo en 200 Hz se ha hecho para poder determinar la frecuencia de cambio en la temperatura y la presión. De acuerdo al Teorema de Nyquist, con esta frecuencia de muestreo es posible detectar en la señal frecuencias de hasta 100 Hz. Se ha utilizado el paquete Scilab para desarrollar la calibración y cambio de unidades de cada uno de los sensores.

Conclusiones

El objetivo principal de esta tesis ha sido el estudio termodinámico de la generación directa en un colector solar prototipo, el cual al hacer uso de la óptica de no enfoque nos permite mostrar un procedimiento nuevo en la disciplina del uso de la energía solar. Iniciando con una demostración matemática alterna, se mostró la forma que tiene el receptor del colector solar (originalmente de [E. Rincón y F. Osorio 2002]) que utilizamos para llevar a cabo las mediciones. La expresión que obtengo da lugar al ángulo de aceptación, el cual ayudó a presentar la trayectoria y dirección que seguirían los rayos dentro del colector, ayudando visualmente a mostrar el buen desempeño de esta curva en un colector solar.

Experimentalmente, se obtuvieron datos de presión y temperatura dentro del tubo absorbedor del orden de 2.15 atm y 120 °C, con un diagrama P-T obtengo una imagen global de estas variables en su estado de saturación. Con los datos registrados pude, también determinar los parámetros involucrados dentro del tubo como son: la constante de enfriamiento y la irradiancia efectiva con valores de 2.09 J/sK y 250 J/s respectivamente. Esta información me permitió modelar la temperatura del tubo absorbedor que se tendría en la presencia de diferentes cantidades de irradiancia, es decir, se hizo el modelo con una selección por día del mes de mayo del 2009 con diferentes características: escasas de nubes días claros, intermedios y extremadamente nublados. Las cantidades de irradiancia nos permitieron observar que la temperatura tendría un comportamiento favorable, pues en todos los resultados de las simulaciones se tuvo en mayor o menor medida la presencia de altas temperaturas, es decir, superiores a los 120 °C.

Al poder tener acceso a la información del taller de Meteorología de UNAM, Facultad de Ciencias se estipuló la irradiancia promedio que se obtuvo durante el 2009, lo que permitió establecer una relación entre el área de abertura, la irradiancia y energía .

Dado que nuestro colector tiene un área de, la energía colectada por él será de 3 956 271.77 J, la potencia 274.74 W, mientras que para la irradiancia se tiene un valor de 692.7775 W/m².

A partir de los ensayos experimentales del colector se llegó a que:

- El proyecto demuestra que es posible desarrollar la tecnología apropiada para el diseño, cálculo y construcción de colectores solares.
- El calor que toma del medio el colector, es el que al final determinará la ganancia útil.
- Al tener incrementos de temperatura se tomaron en cuenta las pérdidas que se presentaron, haciendo que uno de los objetivos del diseño general del sistema fuera el de reducir al mínimo los factores que pudieran generar las caídas de temperatura.

Este trabajo puede servir de guía para la planeación de equipos en los cuales se quiera aprovechar la energía solar a partir de sus transferencias de calor y obtener así un mejor aprovechamiento de la misma como en el caso de un horno solar o un comal solar.

Índice alfabético

- Ángulo Cenital, 11
- Ángulo azimutal, 11
- Ángulo horario, 11
- Absorción, 6, 10, 19, 34, 35
 - índice de, 35
 - tubo de, 35
- Absortancia, 6, 16, 17, 35
- Afelio, 8
- Albedo, 6, 30
- Autocero, 62
- Campo de visión, 25
- Captor, 55
 - piezoeléctrico, 68
- Coefficiente Piezoeléctrico, 55
- Colector solar, 13, 17
 - energía en un, 3
 - prototipo de, 19, 20
 - relación de concentración de un, 15
- Concentrador
 - ángulo de aceptación de un, 15, 25, 32–34
- Constante Dieléctrica, 55
- Constante solar, 10
- Cuerpo negro, 3–5, 16
- Declinación, 8, 11
- Distribución espectral, 4, 16, 17
- Dominio, 56
- Efecto piezoeléctrico, 55
- Emitancia, 16, 17
- Energía radiante, 3, 4, 10, 16, 18
- Energía solar, 3, 4, 8, 9, 13, 18, 19, 31, 35
- Excentricidad, 7–9
- Fotósfera, 3
- Incidencia
 - ángulo de, 10, 11, 16, 20, 23, 33–35
- Inclinación solar
 - ángulo de, 7–9
- Inclinación terrestre
 - ángulo de, 7
- Insolación, 9, 10, 12, 36
- Irradiación, 11
- Irradiación global, 35
- Irradiancia, 4, 10, 26, 29, 31
 - promedio anual de la, 31
 - promedio mensual de la, 31
- Irradiancia espectral, 4
- Irradiancia máxima, 10
- Irradiancia solar, 10, 26
- Joule
 - efecto, 60
- Latitud, 6, 8, 10, 11, 32
- Longitud de onda, 35
- Longitud del día, 4, 9
- Newton
 - método de, 6
- Ohm
 - ley de, 61
- Onda
 - longitud de, 3–6, 16–18
- Peltier
 - Efecto, 58
- Piezo Cerámico, 56
- Planck
 - Ley de, 5
- PT-100, 58, 60
- Radiación, 3
 - curvas de, 30
- Radiación electromagnética, 3, 5

- Radiación solar, 3–13, 17, 30, 31, 34–36
 - componentes de la, 10
 - conversión de la, 13
- Reflectancia, 6, 16, 17, 19
- Reflexión, 6, 19, 35
 - Ley de la, 20, 21
- Reflexión difusa, 20
- Reflexión especular, 20
- Refracción
 - índice de, 35

- Sensor, 55–57, 59, 60, 63–65, 67
 - piezoeléctrico, 57, 68
- Sol, 3, 5, 7
 - altitud del, 4, 8, 9
 - distancia entre la Tierra y el, 6
- Sonda, 55, 58, 65
- Stefan-Boltzman
 - constante de, 5
 - Ley de, 5

- Temperatura
 - coeficiente de, 58
- Temperatura de Curie, 55
- Temperatura efectiva, 3
- Termopares, 58
- Thompson
 - Efecto, 58
- Transductor, 55–57, 63–65
 - activo, 55
 - pasivo, 55
 - piezoeléctrico, 55, 57
- Transmisión, 6, 18, 35
- Transmitancia, 6, 16, 17, 35

- Weiss
 - dominio de, 56
- Wien
 - desplazamiento de, 6

Bibliografía

- [1] McVEIGH, J. C., *Sun Power, An Introduction to the applications of Solar Energy*, Pergamon Press (1977).
- [2] DUFFIE, J. A. Y BECKMAN, W., *A Solar energy thermal processes*, John Wiley and Sons Inc. (1974).
- [3] ALMANZA SALGADO, R. Y MUÑOZ GUTIÉRREZ, F., *Ingeniería de la energía solar*, El Colegio Nacional de México (1994).
- [4] RINCÓN, E. A. Y OSORIO, F. A., “A New Troughlike Nonimaging Solar Concentrator”, *J. Sol. Energy Eng.* **124**, 51-55 (2002)
- [5] RAMÓN, P. A., *Transductores y acondicionadores de señal*, Marcombo (1989).
- [6] CONDE, M., “Thermophysical Properties of $NH_3 + H_2O$ Solutions for the Industrial Design of Absorption Refrigeration Equipment.”, Zurich (2004)
- [7] DOEBELIN, E., *Diseño y aplicaciones de sistemas de medición*, Diana (1980).
- [8] CENGEL, Y. A. Y BOLES, M. A., *Termodinámica*, Diana (1996).
- [9] INCROPERA, F. P. Y DEWITT, D. P., *Fundamentos de transferencia de calor*, Prentice Hall (1999).
- [10] MANRIQUE, J. A., *Energía solar: Fundamentos y aplicaciones fototérmicas*, Harla (1984).
- [11] CREUS, A., *Instrumentación industrial*, Marcombo (2005).
- [12] PALLAS, R., *Adquisición y Distribución de Señales*, Marcombo (1993).
- [13] RASHID, M. H., *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*, Prentice Hall (2002).
- [14] BEJAN, A., *Advanced Engineering thermodynamics*, John Wiley & Sons (1997).
- [15] CHAPMAN, A.J., *Transmisión del calor*, Bellisco (1984).
- [16] CHEN, J. C., “Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Liquids in Convective Flow”, *Int. Eng. Chem. Process Design and Development* **5**, 322-339 (1966)

- [17] INCROPERA, F.P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (2006).
- [18] PETELA, R., “Energy of undiluted thermal radiation”, *Solar Energy* **74**, 469-488 (2003)
- [19] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, section II, parte D, ASME, New York (EEUU), 2001.
- [20] JABER, G. L. Y RUIZ G., *Datos radiométricos 2007*, Facultad de Ciencias UNAM (2009).
- [21] ÖZISIK M. N., *Heat Transfer: A Basic Approach*, McGraw Hill (1985).
- [22] MARIÑO J. B.; VALLVERDÓ F.; RODRÍGUEZ J. A. Y MORENO A., *Tratamiento digital de la señal: Una introducción experimental*, Alfaomega (1999).
- [23] GAUTSCHI G., *Piezoelectric Sensorics*, Springer (2002).