



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES  
AVANZADOS, S.C.**

**”SISTEMA DE COLECTOR  
PLANO PARA DESHIDRATACIÓN SOLAR EN EL VALLE DE  
LA MUERTE”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES**

**P R E S E N T A**

**ING. ROMÁN BRAVO CADENA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M EN C JOSÉ EDUARDO FLORES ORTEGA**

**IXMIQUILPAN HGO MÉXICO 2012**

*Mi profundo agradecimiento:*

Al maestro Eduardo por la paciencia y la guía.

A mis maestros por el conocimiento compartido.

A mi familia, que son la energía renovable del motor de mi búsqueda;  
Román y Marcela, Mis padres incansables; Angy, Chepa y Yesi mis  
hermanas traviesas; Ana y las nenas que me desvelan y desde luego, el  
nene que me da una razón más para seguir adelante.

A todas las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo y a  
las que no también.

*Román Bravo Cadena*

Estamos dando vueltas en el espacio infinito,  
con una velocidad inconcebible,  
todo a nuestro alrededor está girando,  
todo se está moviendo,  
en todas partes hay energía.  
Debe de haber alguna forma de  
proveernos de dicha energía más directamente.  
De esa forma, con la luz obtenida del medio,  
con el poder que deriva de ella,  
con toda esa energía obtenida sin esfuerzo,  
de un almacén inextinguible y eterno,  
la humanidad habrá dado un paso de gigante.  
La sola contemplación de estas magníficas posibilidades  
expande nuestras mentes,  
fortalece nuestras esperanzas y llena nuestros corazones  
con un supremo placer”

*Nikola Tesla. 1891*

# Índice

---

<b>RESUMEN</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>10</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>11</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>12</b>

## **CAPÍTULO I**

### **ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BÁSICOS**

<b>1.1 EL DEVENIR DEL USO DE LA ENERGÍA SOLAR</b>	
1.1.1 Breve historia de la utilización de la energía solar	14
1.1.2 La deshidratación solar, antecedentes	16
1.1.3 Secado y deshidratación	18
1.1.4 Secado solar de alimentos	18
1.1.5 Aprovechamiento y características de la energía solar	18
<b>1.2 FUNDAMENTOS DE GEOMETRÍA, RADIACIÓN SOLAR Y TRANSPORTE DE ENERGÍA</b>	
1.2.1 Relación Sol-Tierra	20
1.2.2 Estructura de la tierra, coordenadas básicas	22
1.2.3. Ajuste de tiempo	25
1.2.4 Ecuación de tiempo	25
1.2.4.1 Corrección de longitud	27
1.2.5. Ángulos solares	28
1.2.6 Radiación solar	34
1.2.6.1 El Sol y la irradiación solar	34
1.2.6.2 Parámetros característicos de las superficies reales para el aprovechamiento térmico de la radiación solar.	39
1.2.7. Clasificación de los colectores solares en función de la razón de concentración	43
1.2.7.1 Elementos básicos del colector de placa plana	45
1.2.8 Calor y transporte de energía	47
1.2.8.1 Ecuaciones de gobierno	50
1.2.8.2 Ecuaciones del Movimiento	51
1.2.8.2.1 Ecuaciones de transformación	52
1.2.8.3 El principio de la mínima acción	52
1.2.8.4 Ecuaciones de Lagrange	53
1.2.8.5 Ecuaciones de Hamilton	54
1.2.8.6 La ecuación de Hamilton-Jacobi	55

## CAPÍTULO II

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 2.1 ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN EL VALLE DE LA MUERTE

2.1.1	Secuencia para la estimación de radiación solar en superficies	59
2.1.1.1.	Disponibilidad del recurso solar en México	60
2.1.2.	Ubicación del lugar de trabajo	62
2.1.2.1.	Ixmiquilpan, en el Valle de la Muerte	62
2.1.2.2.	Características climáticas del valle del Mezquital	63
2.1.3	Caracterización de la energía solar para la latitud 20.49 y longitud -99.21	63
2.1.4	Inclinación óptima para captación de recurso solar en el Valle de la Muerte	74

#### 2.2 CÁLCULOS PARA COLECTOR PLANO

2.2.1	Tecnologías de captación solar térmica.	76
2.2.1.1	Colectores sin concentración	77
2.2.2.	Análisis térmico	79
2.2.3	Estimación de pérdidas térmicas	83
2.2.3.1	Flujo de calor de placa hacia la cubierta de vidrio	84
2.2.3.2	Flujo de calor desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente	86
2.2.3.3	Flujo de calor desde la parte posterior de la caja hacia el ambiente	87
2.2.3.4	Flujo de calor desde los lados de la caja hacia el ambiente	88
2.2.3.5	Coefficiente global de pérdidas de calor	88
2.2.3.6.	Eficiencia del colector	89
2.2.4	Cálculos para colector plano, un caso especial en el valle del mezquital	89

## CAPÍTULO III

### MODELADO, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1	Calor teórico útil en el colector	93
3.2	Radiación medida en el colector	94
3.3	Modelado para determinar las condiciones de transporte	96
3.4	Medición del calor útil en el colector	99
3.5.	Balance energético	102
<b>Conclusiones</b>		106
<b>Referencias</b>		108
<b>Símbolos y abreviaturas.</b>		111
<b>Anexos</b>		
Anexo I	Radiación teórica mensual promedio por hora	114
Anexo II	Calor teórico útil por hora & mes	115
Anexo III	Radiación medida mensual promedio por hora	116
Anexo IV	Calor medido útil por hora & mes	117

# Resumen

---

Este trabajo expone un caso de utilización de la energía solar para calentar aire en un colector de placa plana, el fluido puede ser utilizado para deshidratar diferentes perecederos, como frutas, hierbas de olor, etc. en el Valle de la Muerte (Ixmiquilpan Hidalgo). Se estimó la radiación solar y la inclinación de un colector, para tener el máximo de radiación absorbida a lo largo del año. Se realizaron mediciones de la radiación solar en el Valle de la Muerte; se estimó y se midió el calor útil en el colector solar y se hizo el modelado para obtener el estado mecánico del fluido, proponiendo la solución por Hamilton-Jacobi.

# Introducción

---

En el México prehispánico, en prácticamente todos los centros ceremoniales de los pueblos de las diferentes culturas que habitaron el Anáhuac, desde Olmecas, teotihuacanos, toltecas, aztecas, mayas, etc., se erigieron templos al sol, de acuerdo con escritos de los españoles del siglo XVI que destruyeron los monumentos de los indígenas, en lo alto de la “Pirámide del Sol” de Teotihuacán había un ídolo de piedra que representaba al dios supremo Tonakatektli deidad solar, que el arzobispo Zumárraga mando destruir.

La pirámide principal de Calixtlahuaca, en las inmediaciones de Toluca capital del estado de México, está dedicada a Ejekatl-Quetzalcoatl, deidad del viento (tan milagroso o más que el Dios Eolo de la mitología griega). La pirámide de Tenayuca fue dedicada al culto Solar; durante los solsticios de verano e invierno, su eje principal apunta hacia la puesta del sol y las cabezas de dos grandes serpientes miran hacia el punto del ocaso.

Por su parte, en la pirámide conocida como “el Castillo” de Chichen-Itzá, Yucatán, durante los equinoccios de primavera y otoño, las sombras que el sol dibuja sobre la escalinata de la pirámide, corresponden al patrón de la piel de una serpiente de cascabel. Por cierto, el nombre maya de la deidad Hurakan, se emplea en todo el mundo para designar un fenómeno meteorológico muy frecuente en los países tropicales costeros.

Evidentemente, para los antiguos mexicanos, como seguramente también ocurría en las antiguas civilizaciones de otras latitudes y longitudes de nuestro planeta, la energía solar y sus manifestaciones secundarias, por haber sido la base de su vida, la asociaban a deidades todopoderosas, como en realidad quizá lo sea el sol, a fin de cuentas esto es cuestión de muy respetables creencias.(E. A. Rincón)

Desde tiempos inmemoriales, para el Valle de la Muerte (Valle del Mezquital), el secado al sol ha constituido un método de conservación para chiles y algunos granos, más el uso de deshidratadores solares es casi desconocido en la región, ignorándose que además de lograr una mejor calidad en sabor y apariencia de los productos, se obtienen las siguientes ventajas:

- Un proceso de deshidratado en menos tiempo, alrededor de dos a tres días menos.
- En los tiempos de lluvia no se necesita recoger el producto.
- Se evita una muy probable infestación de insectos y la contaminación y pérdida por los excrementos de pájaros y ratas.

El crecimiento poblacional y la economía de mercado han aumentado la demanda de productos y energía, por lo que la utilización de deshidratadores solares que permitan el consumo y utilización de los recursos naturales de la región, con bajo costo y máximo de utilidades, es hoy por hoy, una alternativa para el desarrollo de comunidades marginadas y de escasos recursos.

El Caracterizar recurso energético solar para el Valle de la Muerte, el definir variables y modelado matemático del sistema colector- recurso energético, así como el diseño de colector plano para secado y calentamiento de aire por convección natural, serán objetivos primordiales para la implementación de colectores planos, que permitirán desarrollar e implementar deshidratadores utilizando colectores solares.

La energía solar es un recurso renovable, gratuito y con elevado índice de incidencia en el Valle de la Muerte (alrededor de 340 días soleados al año), por lo que puede ser utilizada para el aprovechamiento de frutas y verduras que se producen en la zona, deshidratándolas para su consumo y comercialización, beneficiando a los productores de la región.

En algunas poblaciones, como La Palma, La Lagunita y El Banxú se producen manzanas, peras, duraznos y orégano; que en temporadas de producción, no se utilizan debido a los costos bajos del producto, desperdiciándose mucho de este por la falta de equipos y conocimiento para su conserva por los pobladores.

En la comunidad del Banxú, el deshidratar alimentos beneficiaria a 293 personas, en la Palma a 284, en la Lagunita a 710, 210 en Chichicaxtla, 108 en el Roble y 128 en las Manzanas, sumando un total de 1736 personas beneficiadas de estos lugares marginados, esto sin contar a los productores de otras localidades del municipio de Ixmiquilpan.



En el capítulo I se expone una breve historia de la utilización de la energía solar por el hombre, algunos antecedentes de la deshidratación solar, así como una pequeña explicación del aprovechamiento y características de la energía solar. También contiene los conceptos necesarios para el direccionamiento de un colector, con el objetivo de absorber el máximo de radiación solar; como son la geometría solar, altitud, latitud, etc. También se encuentran conceptos como la misma radiación solar, características solares, tipos de radiación entre otros conceptos utilizados en el desarrollo de colectores solares.

En el capítulo II se encuentra la secuencia para la estimación de radiación solar en superficies, la ubicación, así como la caracterización del lugar de trabajo. También cuenta con información del recurso solar energético disponible para las coordenadas 20° 29' latitud norte, 99° 13' longitud oeste. Este capítulo trata brevemente las tecnologías de captación solar térmica, en especial la tecnología de captación solar de placa plana, los elementos que la componen y el análisis térmico necesario para la obtención del calor útil, a partir de la radiación solar incidente y reflejada, así como la eficiencia y la estimación de pérdidas térmicas en el colector. Al final del capítulo tenemos un caso práctico para el Valle del Mezquital.

En el capítulo III encontraremos el calor teórico útil en el colector, la radiación medida en el lugar de trabajo, el modelado para determinar las condiciones de transporte, la medición del calor útil en el colector y las ecuaciones del estado mecánico presente y futuro del sistema.

Finalmente, se expresan las conclusiones, las referencias y los anexos con las tablas de los valores de la radiación estimada y medida, del calor estimado y del calor medido, información valiosa para el uso de la energía solar en el Valle del Mezquital.

# **HIPÓTESIS.**

---

La energía Solar en el Valle del Mezquital tiene un alto nivel de incidencia, por lo que, su uso en deshidratadores para la conservación de frutas, verduras y diferentes perecederos, sería una alternativa energética viable para la conservación de alimentos. La utilización de colectores planos para obtener calor útil a partir del sol puede ser una buena solución para la construcción de los deshidratadores, permitiendo el mínimo de elementos y de costos en su elaboración.

# OBJETIVOS

---

## Objetivo Principal:

---

- Diseñar un colector solar de placa plana para su utilización en deshidratación de diversos percederos en las regiones marginadas del Valle de la Muerte.

## Objetivos específicos.

---

- Estimar, medir y caracterizar el recurso solar para el valle de la muerte.
- Caracterizar colector plano para calentamiento y flujo de aire por convección natural.
- Obtener el estado mecánico del sistema.

# JUSTIFICACIÓN

---

La energía solar es un recurso renovable, gratuito y con elevado índice de incidencia en el Valle de la Muerte (alrededor de 340 días soleados al año), por lo que puede ser utilizada para el aprovechamiento de frutas y verduras que se producen en la zona, deshidratándolas para su consumo y comercialización, beneficiando a los productores de la región.

Además de lograr una mejor calidad en sabor y apariencia de los productos, se obtienen las siguientes ventajas:

- Un proceso de deshidratado en menos tiempo, alrededor de dos a tres días menos.
- En los tiempos de lluvia no se necesita recoger el producto.
- Se evita una muy probable infestación de insectos y la contaminación y pérdida por los excrementos de pájaros y ratas.

El crecimiento poblacional y la economía de mercado han aumentado la demanda de productos y energía, por lo que la utilización de deshidratadores solares que permitan el consumo y utilización de los recursos naturales de la región, con bajo costo y máximo de utilidades, es hoy por hoy, una alternativa para el desarrollo de comunidades marginadas y de escasos recursos.

---

# CAPÍTULO I

---

## ANTECEDENTES Y CONCEPTOS BÁSICOS

---

En este capítulo se expone una breve historia de la utilización de la energía solar por el hombre, algunos antecedentes de la deshidratación solar, así como una pequeña explicación del aprovechamiento y características de la energía solar. También contiene los conceptos necesarios para el direccionamiento de un colector, con el objetivo de absorber el máximo de radiación solar; como son la geometría solar, altitud, latitud, etc. También se encuentran conceptos como la misma radiación solar, características solares, tipos de radiación entre otros conceptos utilizados en el desarrollo de colectores solares.

## 1.1 El devenir del uso de la Energía Solar

### 1.1.1 Breve historia de la utilización de la energía solar.

El sol, fuente de vida y origen de las diversas formas de energía que el ser humano ha utilizado desde el inicio de su historia, puede satisfacer prácticamente todas nuestras necesidades, si aprendemos cómo aprovechar de forma racional su luz.

El sol (Fig. 1.1.1.1 Daniel Saucedo) es una estrella formada principalmente por hidrógeno en cuarta fase y debido a la alta temperatura (alrededor de dos millones de grados Celsius), se efectúa un proceso de fusión nuclear liberando paquetes de energía ( $h\nu$ ) y transmutándose alrededor de 100 mil millones de toneladas de hidrogeno en helio por segundo, generando de esta forma una fuente prácticamente inagotable de energía.

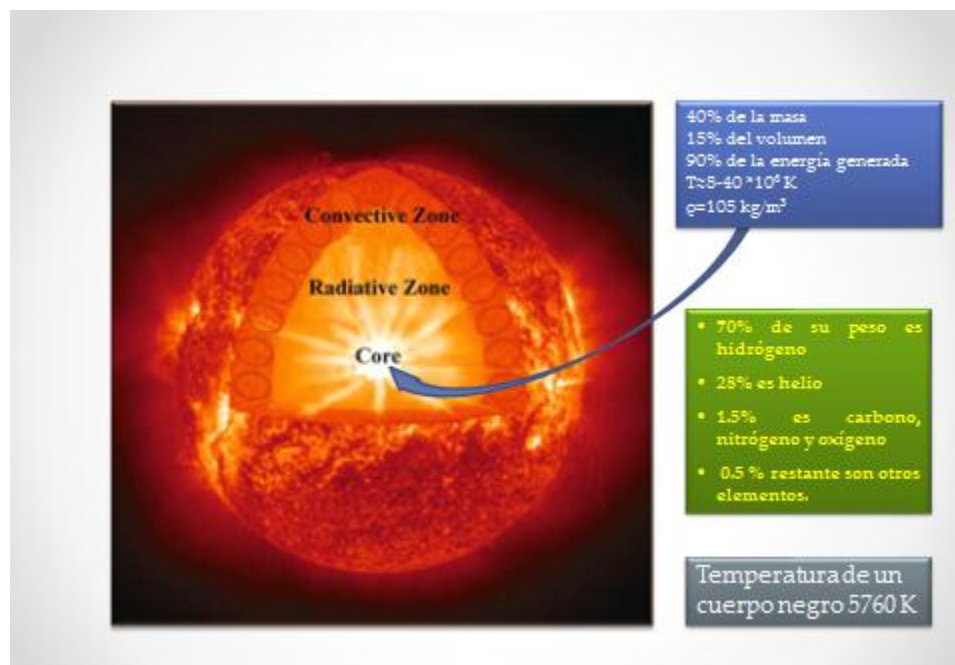


FIGURA 1.1.1.1 Naturaleza de la radiación solar

El sol aporta directa o indirectamente toda la energía que mantiene la vida en la Tierra, y las primeras utilizaciones de la energía solar por los hombres se pierden en la

lejanía de los tiempos. No obstante, por algunas tablillas de arcilla halladas en Mesopotamia, se sabe que hacia el año 2000 antes de J.C. las sacerdotisas encendían el fuego sagrado de los altares mediante espejos curvados de oro pulido.

En Egipto, hacia el año de 1450 antes de Cristo existían unas estatuas sonoras del faraón Amenhotep III. El sonido era producido a consecuencia del aire calentado en sus enormes pedestales, que eran huecos, y que comunicaban con el exterior por un orificio muy pequeño.

Se dice que Arquímedes consiguió quemar las naves romanas que asediaban a Siracusa en el año 212 a.C., concentrando sobre ellas los rayos solares mediante brillantes reflectores. El aprovechamiento térmico del sol era conocido ya por los romanos. Ellos sabían que un cuerpo negro absorbe más la energía calorífica que un cuerpo claro.

En el año 1615 un francés, Solomon de Caux, desarrolló una de las primeras máquinas activadas con energía solar que, mediante la expansión de aire con el calor proveniente del Sol, podía bombear agua.

En el siglo XVII E. W. Tschirnhours usó un espejo parabólico de cobre de 1m de radio como horno para secar porcelana.

El primer colector solar plano fue fabricado por el suizo Nicholas de Saussure (1740-1799), y estaba compuesto por una cubierta de vidrio y una placa metálica negra encerrada en una caja con su correspondiente aislamiento térmico. Este colector solar se utilizó para cocinar alimentos que se introducían en su interior.

El científico sueco Sosses descubrió el efecto invernadero en la segunda mitad del siglo XVIII. Y en 1774 Galileo y Lavoisier usaron la energía del Sol en sus investigaciones, empleando una lente de 1320 mm para calentar materiales, ya que sostenían que este calor tenía más pureza que el producido por otras fuentes por no tener contaminantes.

En 1878 se logró producir hielo empleando energía solar. En 1882 Mouchot y Pifre, en París, crearon una máquina solar de vapor, que hacía funcionar una imprenta, utilizando como colector un concentrador parabólico estañado.

En 1954 se desarrolla la primera celda fotovoltaica de silicio, con un rendimiento del 6%, en la Bell Telephone Laboratories, EE.UU y en 1955 se logra aumentar el rendimiento de la celda fotovoltaica a 11%.

El aprovechamiento de la energía solar ha sido limitado en la historia de la humanidad, ya que a pesar del costo inexistente de la fuente, el equipo necesario para su captación hacía que el costo total de la instalación resultara poco competitivo con los combustibles fósiles, de más fácil utilización.

Fue hasta la gran crisis del petróleo de los años setenta en el siglo pasado, cuando se empezó la difusión masiva de los sistemas solares térmicos. Durante esta crisis energética, en todo el mundo, nacieron empresas que se dedicaban a la fabricación e instalación de colectores solares, pero por falta de experiencia y conocimientos, la mayoría fracasó. Así en esa época, tales empresas se dieron cuenta de que la energía solar, a primera vista, parece una tecnología primitiva y simple, pero requiere unas especificaciones técnicas apropiadas con respecto al uso de materiales, pues no cualquiera soporta temperaturas máximas que superen los 150°C.

La aplicación de la energía solar térmica que ha tenido mayor uso y divulgación es el calentamiento de agua para uso doméstico. Las primeras patentes de calentadores solares aparecieron en Estados Unidos hacia finales del siglo XIX. En México se han estado utilizando y desarrollando estos sistemas desde la década de los cuarenta.

### **1.1.2 La deshidratación solar, antecedentes**

---

El secado o desecación es uno de los procesos más antiguos de preservación de alimento, se remonta posiblemente a la era paleolítica, hace unos 400.000 años, se secaban al sol alimentos como frutas, granos, vegetales, carnes y pescados, aprendiendo mediante ensayos y errores, para conseguir una posibilidad de subsistencia en épocas de escasez de alimentos, no solo necesarios sino que también nutritivos.<sup>1</sup>



Todas las civilizaciones han desarrollado en menor o mayor medida formas de conservar los alimentos de acuerdo a sus necesidades. El más utilizado por todas ellas es la deshidratación / secado de los alimentos, otros métodos como; salados, salmueras, encurtidos, pasteurización, conservantes, y más recientemente, hace tan sólo algunos años la radiación con sus enrevesadas técnicas que desnaturalizan y eliminan la mayoría de los nutrientes de los alimentos.

Todos esos sistemas o métodos gozan de más o menos adeptos, dependiendo en gran medida del tipo de alimento a conservar. El que se adapta mejor a cualquier tipo de producto alimenticio y proporciona una gran estabilidad microbiológica, debido a su reducción de la actividad del agua es la deshidratación además de aportar otras ventajas como la reducción del peso facilitando a su vez el almacenaje, manipulación y transporte de los productos finales deshidratados.

En los alimentos deshidratados, debido a la mínima actividad de agua, los microorganismos no pueden proliferar y quedan detenidas la mayoría de las reacciones químicas y enzimáticas de alteración.

De acuerdo con **King** (1974) el objetivo del secado es reducir el contenido de humedad de un producto para lograr períodos de almacenamiento más largos. La calidad y el costo de un producto están influenciados fuertemente por la operación de secado. La calidad se evalúa por la cantidad de degradaciones físicas y bioquímicas que ocurren en el alimento y depende de la temperatura, el tiempo de secado y de la actividad de agua.<sup>2</sup>

1 THE REHYDRATION OF DEHYDRATED FOODS  
EDUARDO MARÍN B. (1), ROBERTO LEMUS M. (2), VERÓNICA FLORES M. (2), ANTONIO VEGA G. (2)  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA, UNIVERSIDAD DE LA SERENA, LA SERENA, CHILE.

2 USO DE LA ENERGÍA SOLAR, EN DESHIDRATACIÓN DE FRUTAS Y VERDURAS.  
BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA.  
M.I. ELVIRA JUÁREZ HERNÁNDEZ

### **1.1.3 Secado y deshidratación**

---

Aunque ambos términos se aplican a la eliminación del agua de los alimentos, en la tecnología de los alimentos el término secado se refiere a la desecación natural, como la que se obtiene exponiendo el producto a la acción del sol y el de deshidratación designa el secado por medios artificiales, como la exposición del producto a una corriente de aire caliente.

La deshidratación implica el control sobre las condiciones climáticas dentro de una cámara o el control de un micromedio circundante. El secado solar está a merced de los elementos. Los alimentos secados en una deshidratadora pueden tener mejor calidad que sus duplicados secados al sol. Se necesita menos terreno para la actividad deshidratadora.

### **1.1.4 Secado solar de alimentos**

---

El secado solar de alimentos puede estar enfocado a aquellos que viven en lugares remotos, donde tienen abundantes cosechas durante el verano, las que están condenadas a una rápida descomposición si no se tiene un método simple y económico para preservarlas. El secado solar de alimentos puede ser llevado a cabo en casi todas las locaciones, tomando en cuenta la cantidad de radiación solar y la humedad relativa del lugar.

La luz directa del sol no es aconsejable, en el caso de las frutas se oxidan rápidamente, pierden su color natural y obtienen un mal aspecto, las atacan los insectos o los pájaros por lo que el producto se contamina, en el caso de los vegetales; el producto se pone amarillo y pierde propiedades.

### **1.1.5 Aprovechamiento y características de la energía solar**

---

La radiación solar al tope de la atmósfera terrestre es de  $170 \times 10^{12}$  kW, aproximadamente  $1.35 \text{ kW/m}^2$ .

Si consideramos que el 30% de ésta es reflejada al espacio, el 23% utilizada para el ciclo hidrológico y el 47% restante absorbida en los mares, tierra y la propia atmósfera, tenemos que la energía sobre las masas continentales es de aproximadamente  $26 \times 10^{12}$  kW, valor que corresponde a unas 3000 veces el consumo de energía actual de la humanidad.

## Características de la energía solar

La energía solar presenta dos características especiales muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales: dispersión e intermitencia.

- *Dispersión:* En condiciones favorables, la densidad de la energía del sol apenas alcanza  $1 \text{ kW/m}^2$ , un valor muy por debajo del que se requiere para producir trabajo. Esto significa que, para obtener densidades energéticas elevadas, se necesitan grandes superficies de captación, o sistemas de concentración de los *rayos solares*.
- *Intermitencia:* La energía solar no es continua, lo cual hace necesarios sistemas de almacenamiento.

## Aprovechamiento

El aprovechamiento de la energía solar se puede llevar a cabo de dos formas: el aprovechamiento pasivo y el activo.

El aprovechamiento **pasivo** de la energía solar no requiere ningún dispositivo para captarla. Por ejemplo, se usa en la arquitectura para sistemas de calefacción en climas fríos, a través de grandes ventanas orientadas hacia donde el sol emite sus rayos durante la mayor parte del día. Otras aplicaciones comunes son el secado de productos agrícolas y de ropa.

El aprovechamiento **activo** sin embargo ofrece soluciones más interesantes, pues ofrece alternativas para el uso de los recursos naturales que, comparadas con otras fuentes de energía, logran beneficios económicos sin deteriorar tales recursos. Los sistemas activos se basan en la captación de la radiación solar por medio de un elemento denominado “colector”.

Podemos dividir el aprovechamiento de la energía solar en dos grandes grupos:

1. *Sistemas térmicos:* Se trata de equipos que captan la radiación solar y la transforman en calor útil, para ser éste utilizado con fines varios, desde producción de agua caliente, calefacción, destilación, fines industriales, etc.

2. *Sistemas fotovoltaicos*: Se denomina así a los equipos que transforman la luz solar directamente en electricidad, para ser luego utilizada para cualquier fin que la requiera.

El aprovechamiento térmico de la energía solar se divide en tres áreas:

- Aprovechamiento de baja temperatura (menos de 90°C): aplicado para calentamiento de agua y preparación de alimentos.
- Aprovechamiento de mediana temperatura (menos de 300°C): para aplicaciones industriales.
- Aprovechamiento de alta temperatura (hasta 4.000°C): aplicado para la generación de electricidad.

La deshidratación utilizando la energía solar, entra en los sistemas térmicos, y el presente trabajo trata de sistemas térmicos de baja temperatura.

## **1.2 FUNDAMENTOS DE GEOMETRÍA, RADIACIÓN SOLAR Y TRANSPORTE DE ENERGÍA**

---

### **1.2.1 Relación Sol-Tierra.**

---

El sol es una esfera de material gaseoso intensamente caliente con un diámetro de  $1.39 \times 10^9$  m (FIGURA 1.2.1.1). El sol esta aproximadamente a  $1.5 \times 10^8$  Km de la tierra, su radiación viaja a la velocidad de la luz en el vacío (300,000 km/s), y tarda en llegar 8 min y 20s al planeta. Al ser observado desde la tierra, el disco del sol forma un ángulo de 32 grados.

El sol es un cuerpo negro de 5760 K que emite una energía de  $3.8 \times 10^{20}$  MW, equivalente a  $63\text{MW/m}^2$  en su superficie, Esta energía es radiada en todas direcciones. La tierra solamente recibe una fracción de esta energía, equivalente a  $1.7 \times 10^{14}$  kW.

Observado desde la tierra, el camino del sol a través del cielo varía en el transcurso del año. La forma descrita por la posición del sol, considerando a la misma hora cada día durante un año completo, se llama analemma; ubicada entre el eje norte sur, teniendo una variación muy evidente, oscilando con un ángulo de  $47^\circ\text{C}$  (porque el eje de la tierra tiene una inclinación de  $23.5^\circ\text{C}$  con respecto del sol), llamada declinación.

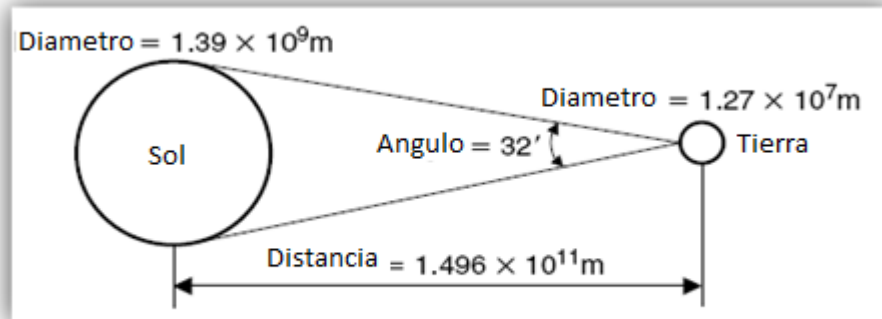


FIGURA 1.2.1.1 Relación Sol-Tierra

El conocimiento de la trayectoria solar, es necesario para calcular la radiación solar que incide en una superficie, la ganancia de calor solar, la orientación de los colectores solares, la colocación de los colectores para evitar las sombras, etc.

## 1.2.2 Estructura de la tierra, coordenadas básicas.

### *Líneas imaginarias: Coordenadas básicas*

Las principales líneas imaginarias del globo terráqueo son: los trópicos de Cáncer ( $23^{\circ}27'N$ ) y de capricornio ( $23^{\circ}27'S$ ); los círculos polares, Árticos ( $66^{\circ}33'N$ ) y antártico ( $66^{\circ}33'S$ ), y el meridiano y paralelo cero (Greenwich y ecuador), que nos permiten determinar la longitud y la latitud respectivamente. Vea FIGURA 1.2.2.1

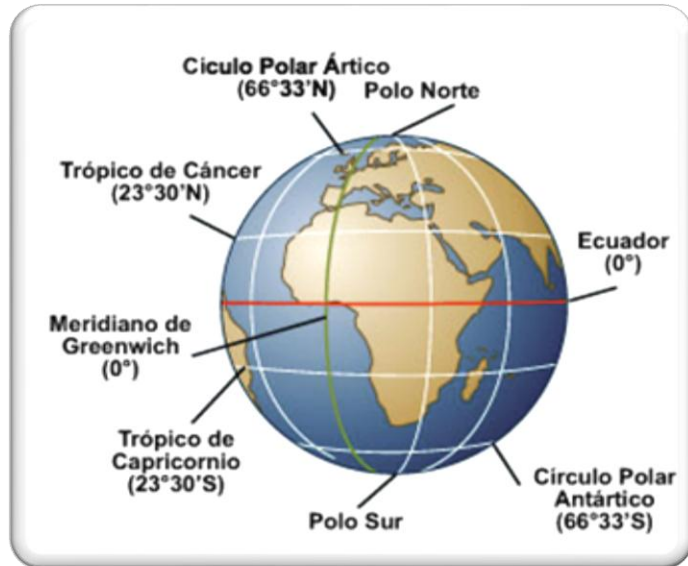


FIGURA 1.2.2.1 Coordenadas Básicas

### *Meridianos.*

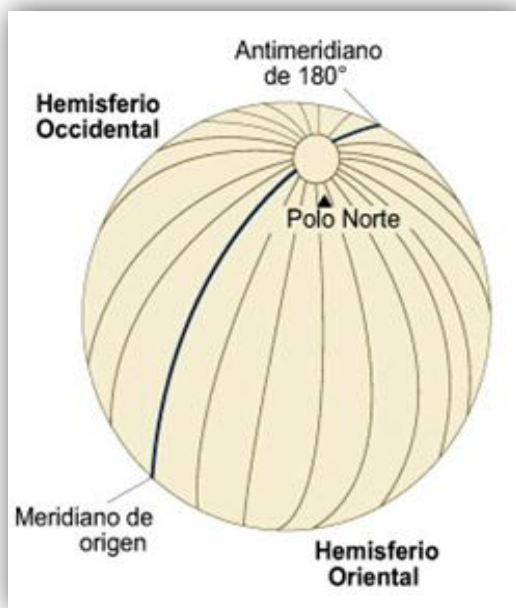


FIGURA 1.2.2.2 Distribución de meridianos

Los meridianos son semicircunferencias con orientación norte-sur cuyos extremos llegan a los polos.

El meridiano cero grados es el de Greenwich, que divide al globo en hemisferio oriental y occidental, en total hay 360 meridianos, 180 al este y 180 al oeste. (FIGURA 1.2.2.2). Como son circunferencias, cada meridiano tiene un antimeridiano que es su opuesto.

### *Paralelos*

Los paralelos son líneas imaginarias en forma de circunferencia, trazadas en dirección perpendicular al eje terrestre con orientación este-oeste. La FIGURA 1.2.2.3. muestra la distribución de paralelos.

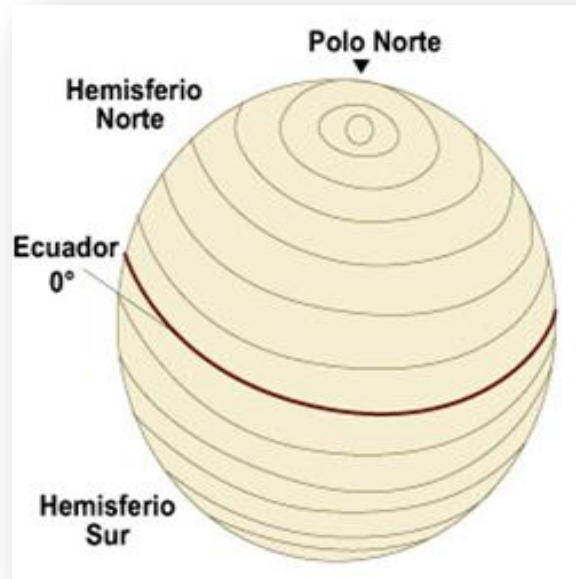


FIGURA 1.2.2.3. Distribución de paralelos

La línea del Ecuador que divide el planeta en dos hemisferios, es el paralelo de mayor extensión y marca el grado cero. Existen noventa paralelos hacia el norte y noventa hacia el sur.

### *Coordenadas terrestres.*

Los paralelos y meridianos forman una red geográfica de líneas imaginarias que permiten ubicar la posición de un punto cualquiera en la superficie terrestre. Éstas se definen con Coordenadas Geográficas o Terrestres, las cuales son la Latitud y Longitud; se expresan en grados sexagesimales.

**La Latitud:** es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Ecuador. El Ecuador se toma como línea de base, y le corresponde la Latitud de  $0^\circ$ . Todos los puntos que estén ubicados en el mismo paralelo, les corresponden la misma latitud. Todos aquellos que se encuentren al Sur del Ecuador, reciben la denominación Sur (S), con signo negativo; y aquellos que se encuentren al Norte del Ecuador, reciben la denominación Norte (N), con signo positivo. La Latitud es siempre menor a  $90^\circ$ .

**La Longitud:** es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich. El Meridiano de Greenwich se toma como la línea de base, y le corresponde la Longitud de  $0^\circ$ . Todos los puntos ubicados sobre el mismo meridiano, tienen la misma longitud. Aquellos puntos que se encuentren al Oriente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Este (E); y todos los puntos ubicados al Occidente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Oeste (W). La Longitud se mide desde los  $0^\circ$  a los  $180^\circ$ , mientras que los polos Norte y Sur no tienen Longitud. En la FIGURA 1.2.2.4, se observa la distribución de longitud y latitud.

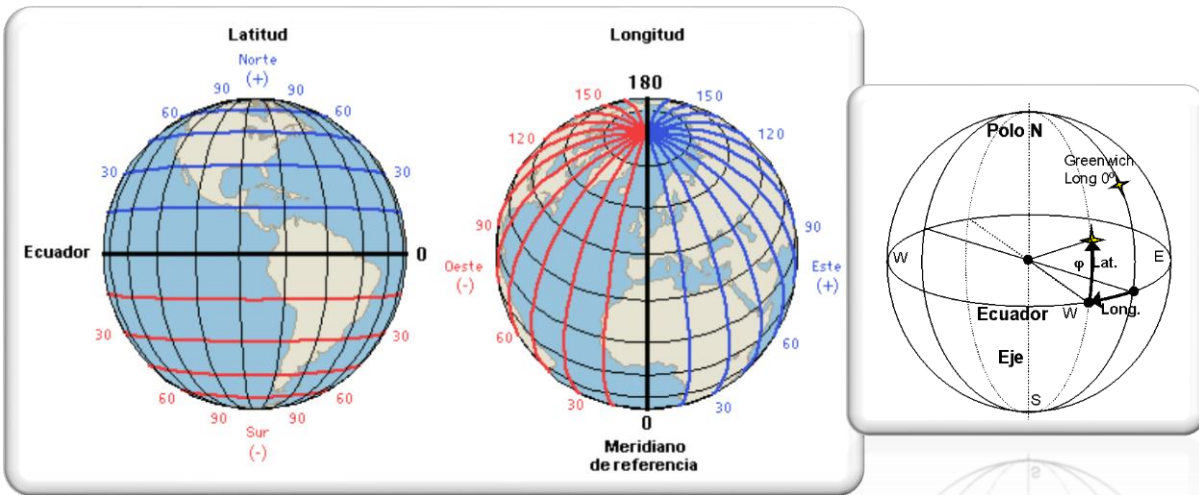


Figura 1.2.2.4 Distribución de longitud y latitud

Conociendo las coordenadas geográficas, es posible ubicar cualquier punto en la superficie terrestre. Basta con tomar el Ecuador, y a partir del Meridiano de Greenwich tomar un arco igual a la longitud, en caso de tener el Polo norte en la parte superior, hacia la izquierda (longitud oeste), o hacia la derecha (longitud este), en caso de tratarse del Polo Sur serán opuestos. Sobre el extremo del arco dibujaremos el meridiano del lugar, sobre éste tomamos un arco que será igual a la latitud, así estaremos marcando un punto que corresponde a las coordenadas que conocemos.



### 1.2.3. Ajuste de tiempo

---

En los cálculos de la energía solar, el tiempo solar aparente (AST) se debe utilizar para expresar la hora del día. El tiempo solar aparente está basado en el movimiento angular del sol en el cielo. El momento en que se observa que el sol cruza el meridiano es el mediodía solar local. Esto usualmente no coincide con las 12:00h del tiempo local. Se debe de convertir el tiempo local estándar (LST) en tiempo solar aparente. Se aplican 2 correcciones; la ecuación de tiempo y la corrección de longitud.

### 1.2.4 Ecuación de tiempo

---

Debido a factores asociados a la órbita de la Tierra alrededor del sol, la velocidad orbital de la Tierra varía a lo largo del año, por lo que el tiempo solar aparente cambia ligeramente; para mantener un reloj que funcione a una velocidad uniforme, utilizamos la ecuación del tiempo (ET). Surge debido a que la duración de los días, es decir, el tiempo requerido por la tierra, para completar una revolución sobre su propio eje con respecto al sol, no es uniforme en el transcurso del año.

Para cualquier día del año, el tamaño de los días son de 24 horas<sup>3</sup>; sin embargo, la luz del día varía debido a la excentricidad de la órbita de la tierra y la inclinación del eje terrestre desde el plano normal de la órbita. Gracias a la elípticidad de la órbita, la tierra está más cerca del sol el 3 de enero y más lejos el 4 de julio, por lo tanto la velocidad media que orbita la Tierra, es más rápida en la mitad del año a partir de octubre a marzo, y más lenta que la velocidad media de la otra mitad del año (desde abril a septiembre).<sup>4</sup>

Los valores de la ecuación del tiempo en función de los días del año(N) se pueden obtener aproximadamente a partir de la siguiente ecuación:

$$ET = 9.87 \sin(2B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) [\text{min}] \quad (2.4.1)$$

Y B se calcula a partir de

$$B = (N - 81) \left( \frac{360}{364} \right) \quad (2.4.2)$$

3 EL DÍA MEDIO SOLAR ES DE 24H3M26S.5536, Y EL DÍA MEDIO SIDERAL ES DE 23H56M4S BATE, MULLER, WHITW 1971

4 KALOGIROU SOTERIS 2009

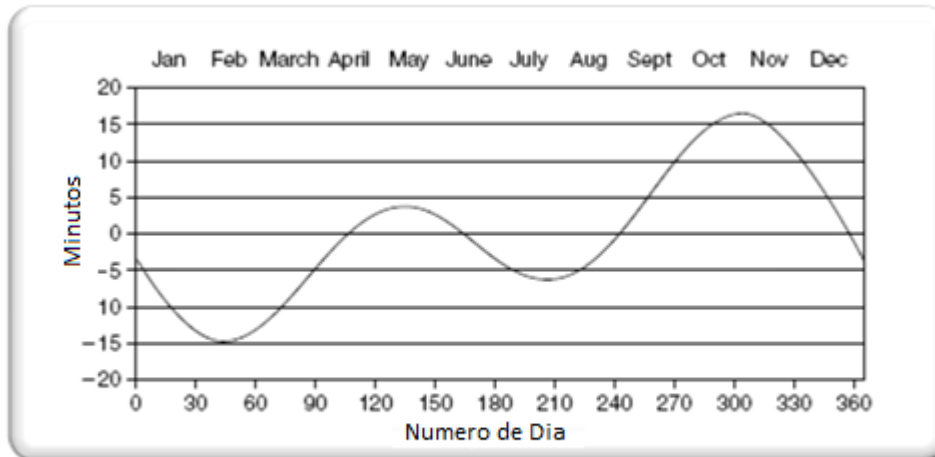


FIGURA 1.2.4.1 Ecuación del tiempo

Una representación gráfica de la ecuación del tiempo esta mostrada en la FIGURA 1.2.4.1, Con la cual, la ecuación del tiempo puede ser obtenida directamente. Para la obtención de N (día juliano) se utiliza la tabla 1.2.4.1. donde  $i$  es el número del día del mes.

**n = día juliano**

MES	"n" para el i-ésimo día del mes (Para año bisiesto sumar 1 a las constantes con *)
Enero	$i$
Febrero	$31 + i$
Marzo	$59 + i^*$
Abril	$90 + i^*$
Mayo	$120 + i^*$
Junio	$151 + i^*$
Julio	$181 + i^*$
Agosto	$212 + i^*$
Septiembre	$243 + i^*$
Octubre	$273 + i^*$
Noviembre	$304 + i^*$
Diciembre	$334 + i^*$

TABLA 1.2.4.1 Cálculo para día juliano

### 1.2.4.1 Corrección de longitud.

El tiempo estándar es contado a partir de un meridiano cerca del centro o a partir del meridiano estándar, el Greenwich; con una longitud de cero. Dado que el sol tarda 4 min en avanzar transversalmente un 1° de longitud. El termino de corrección de longitud  $4X(\text{Longitud estándar} - \text{Longitud local})$  debe de ser sumado o restado de la hora estándar de la localidad. Esta corrección es constante para cualquier longitud en particular, la regla debe de ser seguida respetando la convención de signo. Si la locación está situada al este del meridiano estándar, la corrección es sumada a la hora del reloj. Si la locación está situada al oeste del meridiano estándar, la corrección se resta.

La ecuación general para calcular el tiempo solar aparente (AST) es

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (1.2.4.3)$$

donde

LST = tiempo local estándar

ET = ecuación de tiempo

SL = longitud estándar

LL = longitud Local

DS = horario de verano para el centro de México (entre 0 y 60 min)

• El valor del Meridiano de Referencia ( $L_{st}$ ) en grados (°)

ESTADOS	MERIDIANO DE REFERENCIA	
	Del último domingo de octubre a partir de las 3 de la mañana y hasta el primer domingo de abril, hasta las 3 de la mañana	De primer domingo de abril a partir de las 3 de la mañana y hasta el último domingo de octubre, hasta las 3 de la mañana
Sonora	105°	
Baja California	120°	105°
Baja California Sur, Chihuahua, Sinaloa y Nayarit	105°	90°
Resto de las entidades federativas	90°	75°

TABLA 1.2.4.2 Meridianos de referencia para la república mexicana

Si la locación esta al este del meridiano de Greenwich, el signo de la ecuación (1.2.4.3) es negativo y si esta al oeste será positivo. Si se utiliza horario de verano, esto debe ser restado de la hora estándar local.

En la tabla 1.2.4.2 se muestran los meridianos de referencia para la república mexicana.

### 1.2.5. Ángulos solares.

La tierra hace una rotación alrededor de su eje en 24h y completa un ciclo alrededor del sol en aproximadamente 365.25 días. Esta revolución no es circular, pero sigue una trayectoria elíptica teniendo al sol en uno de sus focos, esto se muestra en la FIGURA 1.2.5.1. La excentricidad  $e$  de la órbita de la tierra es muy pequeña, igual a 0.01673. Por lo tanto la órbita de la tierra alrededor del sol es casi circular. La distancia del sol a la tierra,  $R$ , es el perihelio (Distancia más corta, el 3 de enero) y el aphelio (Distancia más larga, el 4 de julio) y la relación del radio fue escrita por Garg (1982) y es la ecuación 1.2.5.1:

$$R = a(1 \pm e) \quad (1.2.5.1)$$

Dónde:

$$a = \text{Distancia medida del sol a la tierra} = 149.5985 \times 10^6 \text{ Km}$$

El signo más de la ecuación (1.2.5.1) es para la posición del aphelio, El signo menos es para la posición del perihelio. La solución de la ecuación 1.2.5.1, da el valor de más distancia de  $152.1 \times 10^6$  Km y un valor para la distancia más corta de  $147.1 \times 10^6$  km como se muestra en la FIGURA 1.2.5.1. La diferencia entre las dos distancias es solamente el 3.3%. Lo que significa que la distancia sol-Tierra,  $a$ , está definida a la mitad de la suma del perihelio y el aphelio.

La posición del sol en el cielo cambia día a día y hora tras hora. Es sabido que el sol está en la posición más alta del cielo en el verano que en el invierno. El movimiento del sol y la tierra no es tan simple, pero puede ser sistemático y predecible.

En el transcurso del año, la tierra se mueve alrededor del sol en una órbita de forma elíptica, la tierra gira sobre su propio eje cada 24 h aproximadamente, y tiene un ángulo de inclinación de  $23^{\circ}27.14 \text{ min}$  ( $23.45^{\circ}$ ) en el plano de la eclíptica de la tierra y el ecuador del sol. Esto se puede observar en la FIGURA 1.2.5.1

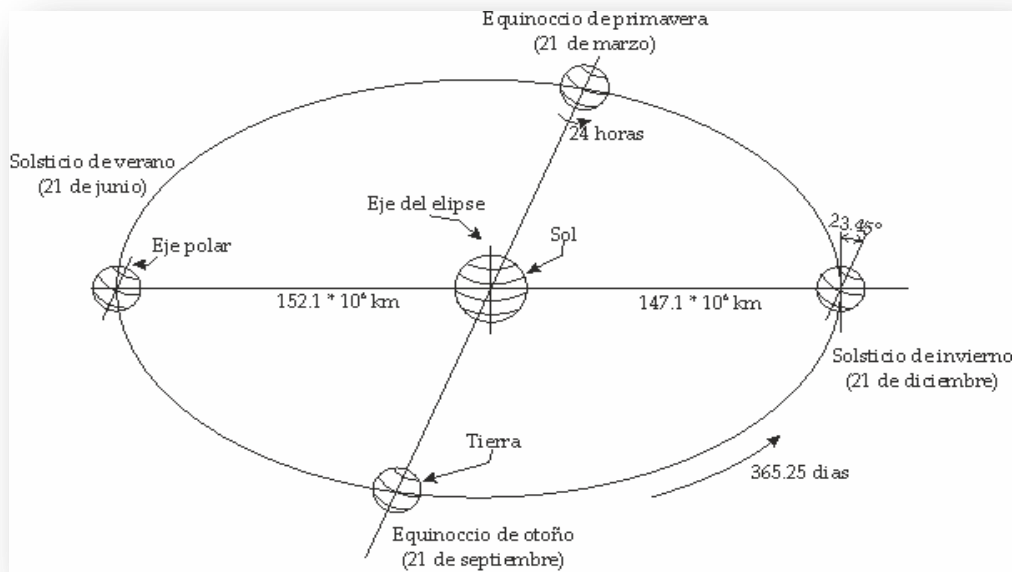


FIGURA 1.2.5.1 Movimiento anual de la tierra con respecto al sol

El movimiento aparente del sol es en un arco a través del cielo, alcanzando su punto más alto al medio día. Como el invierno se convierte en primavera y luego el verano, los puntos de salida y puesta del sol avanzan gradualmente hacia el norte a lo largo del horizonte. En el hemisferio norte, los días se alargan, el sol sale más temprano. En Junio 21 el sol alcanza su posición más al norte con respecto a la tierra y se le conoce como solsticio de verano. Seis meses después, en diciembre 21 tenemos el solsticio de invierno, donde el sol alcanza su posición más al sur. (Vea FIGURA 1.2.5.2)

En el 21 de marzo<sup>5</sup> y el 21 de septiembre, el día y la noche son iguales, se les conoce como los equinoccios de primavera y otoño respectivamente.

Los solsticios de verano y otoño en el hemisferio sur son, el 21 de diciembre para el de verano y el 21 de junio para el invierno.

La visión ptolemaica del movimiento del sol, se utiliza en el análisis para obtener algunos ángulos importantes en la utilización de la energía solar. Ya que todo movimiento es relativo, es conveniente considerar a la tierra fija y describir el movimiento virtual del sol, en un sistema de coordenadas fija a la tierra con su origen en el sitio de interés.

Para la mayoría de aplicaciones de energía solar es necesaria una precisión razonable de la posición del sol en el cielo en el transcurso del día y del año. En el sentido ptolomeico, el sol está obligado a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste, su posición con respecto a un observador en la tierra puede ser completamente descrita por medidas de dos ángulos astronómicos, la altitud solar ( $\alpha$ ), y el azimut solar ( $z$ ). Véase la FIGURA 1.2.5.3

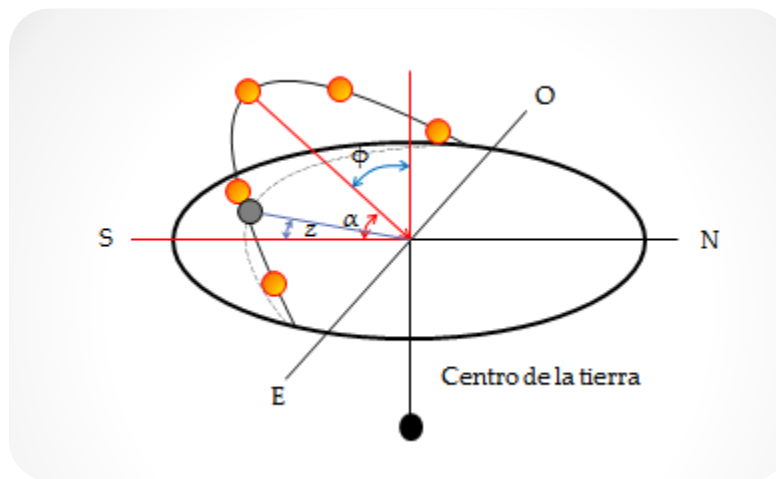


FIGURA 1.2.5.3. Recorrido diario del sol.

5 EQUINOCCIO VERNAL: QUE ES CUANDO CRUZA LA LÍNEA IMAGINARIA FORMADA ENTRE ARIES., EL SOL Y LA TIERRA (WERTZ),

Antes de definir las ecuaciones para los ángulos azimutal y solar, se requiere definir la declinación solar ( $\delta$ ), así como otros ángulos más.

**Angulo de Declinación ( $\delta$ ):** es el ángulo entre el plano ecuatorial y el centro del sol. Al norte es positivo;  $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ . La declinación puede ser encontrada por la ecuación de Cooper.

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right) \tag{1.2.5.2}$$

Donde n=día juliano y puede ser calculado a partir de la tabla 1.2.4.1.

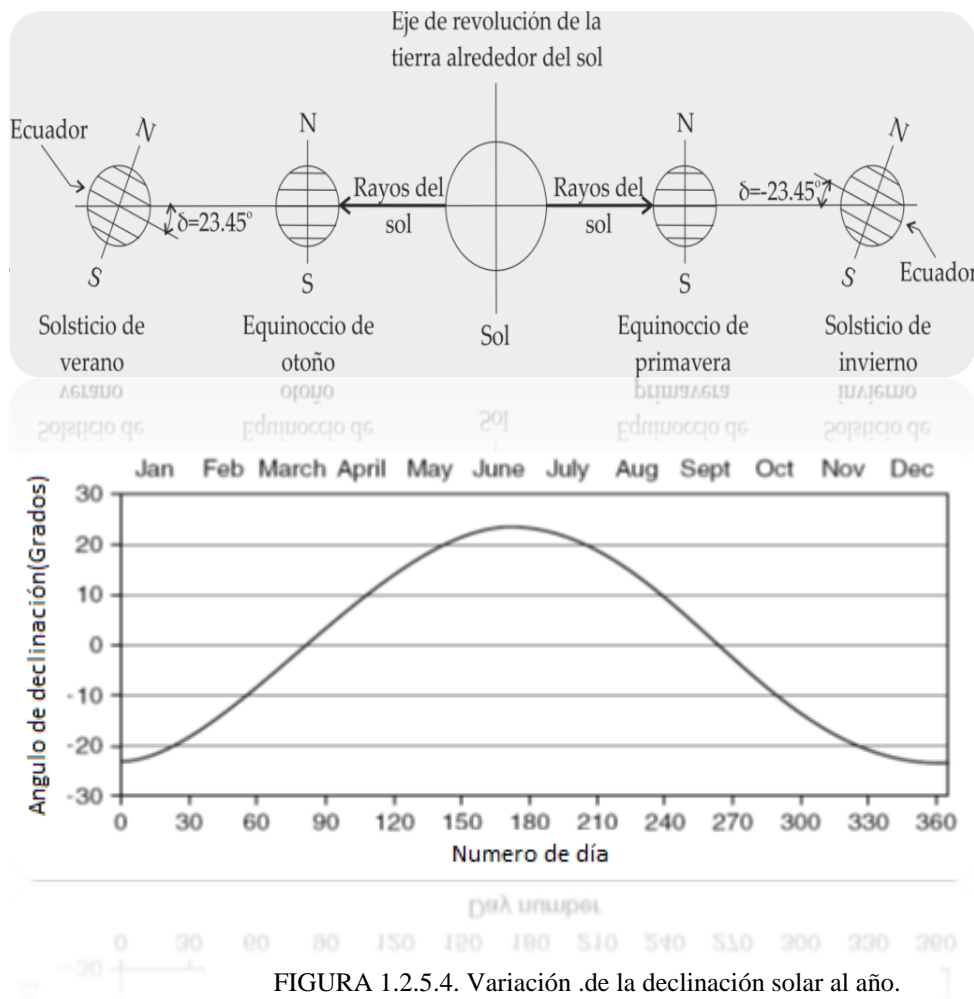


FIGURA 1.2.5.4. Variación de la declinación solar al año.

En la FIGURA 1.2.5.4 se muestra la variación del ángulo de declinación durante los equinoccios y solsticios. Como puede verse, el rango de la declinación va de  $0^\circ$  en el

equinoccio de primavera a  $23.45^\circ$  LN en el solsticio de verano.  $0^\circ$  en el equinoccio de otoño, y  $-23,45^\circ$  en el solsticio de invierno.

**Ángulo de la altitud del sol ( $\alpha$ ):** es el ángulo entre la horizontal y la línea del sol (véase FIGURA 1.2.5.3)

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (1.2.5.3)$$

donde

L = Latitud local,  $\delta$ =declinación, h=ángulo horario

**Ángulo zenital ( $\phi$ ):** es el ángulo entre la vertical y la línea del sol, es decir, el complemento de la altura solar. (Véase FIGURA 1.2.5.3).

**Ángulo azimutal ( $z$ ):** es el ángulo entre la línea del sol y el sur geográfico

$$\text{sen } z = \frac{\cos(\delta)\text{sen}(h)}{\cos(\alpha)} \quad (1.2.5.4)$$

**Ángulo horario ( $h$ ):** es el desplazamiento angular del sol desde el este al oeste del meridiano local propio de la rotación de la tierra en este eje a  $15^\circ$  por hora; en la mañana es negativo y en la tarde es positivo.

$$h=0.25 \text{ (número de minutos a partir del mediodía solar)} \quad (1.2.5.5)$$

**Ángulo azimutal en la superficie ( $Z_s$ ):** 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;  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

**Ángulo de incidencia ( $\theta$ ):** es el ángulo entre el haz de radiación en la superficie y la normal a la superficie. El ángulo de incidencia está relacionado con los diferentes ángulos antes descritos bajo las siguientes dos relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Cos } \theta = & \text{sen } \delta \text{ sen } L \text{ cos } \beta - \text{sen } \delta \text{ cos } L \text{ sen } \beta \text{ cos } Z_s + \text{cos } \delta \text{ cos } L \text{ cos } \beta \text{ cos } h + \\ & \text{cos } \delta \text{ sen } L \text{ sen } \beta \text{ cos } Z_s \text{ cos } h + \text{cos } \delta \text{ sen } \beta \text{ sen } Z_s \text{ sen } h \end{aligned} \quad (1.2.5.6)$$



donde  $\beta$ = Ángulo de la superficie inclinada desde la horizontal.

$Z_s$ = Ángulo de superficie azimutal, el ángulo entre la normal a la superficie desde el sur, hacia el oeste, se designa como positivo

Los ángulos básicos descritos en la ecuación (1.2.5.6) se pueden encontrar en la FIGURA 1.2.5.5. Tal es el caso del ángulo de la superficie azimutal, el ángulo zenital, etc.

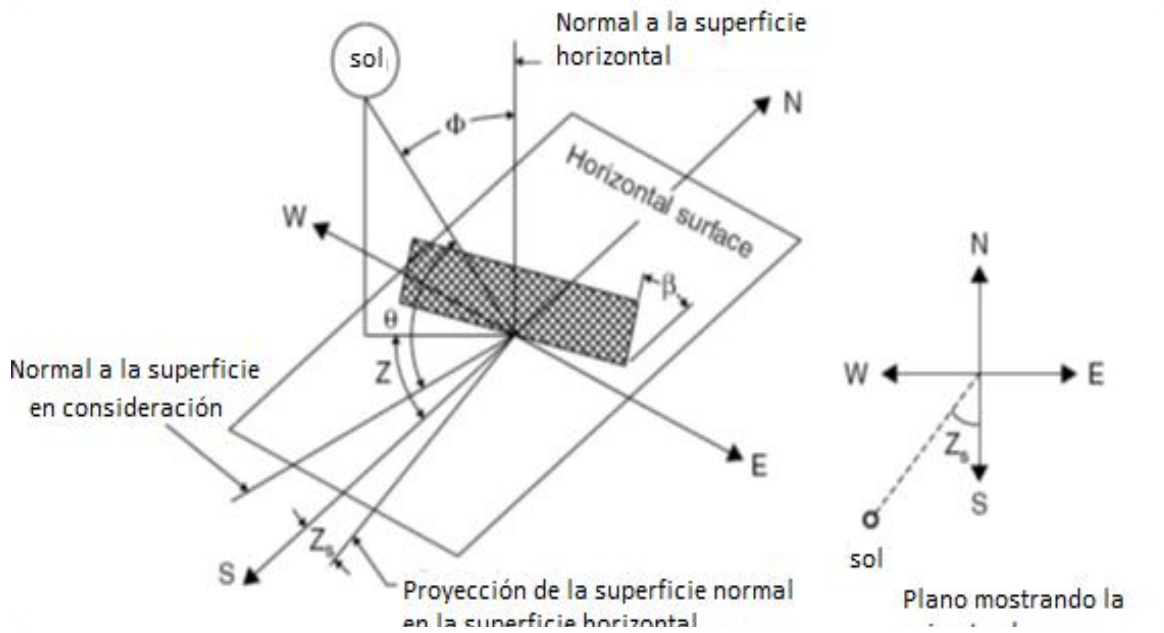


FIGURA 1.2.5.5. Diagrama de ángulos solares.

**Altura máxima del sol para n día**

$$\alpha_{max} = 90 - L - \delta_n \tag{1.2.5.7}$$

**Angulo horario de salida y puesta del sol**

$$h_{ss} = - \tan L \tan \delta \tag{1.2.5.8}$$

**Longitud del día en horas**

$$\text{Longitud del día} = \frac{2}{15} \cos^{-1}[-\tan L \tan \delta] \quad (1.2.5.9).$$

En resumen, La posición del Sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas distintos, ambos centrados en el observador: coordenadas horarias (declinación y ángulo horario) y coordenadas horizontales (altura solar y azimut). Estas coordenadas determinan el vector solar, entendido éste como el vector con origen en el observador y extremo en el Sol.

## 1.2.6 Radiación solar

---

### 1.2.6.1 El Sol y la irradiación solar

---

El Sol, como cualquier otra estrella activa, es un gigantesco reactor de fusión en el que cada segundo se generan 600 millones de toneladas de helio a través del ciclo protón-protón

Estos procesos de fusión nuclear liberan una enorme cantidad de potencia calorífica, evaluada en  $3.86 \times 10^{23}$  kW<sub>th</sub>.

A pesar de la compleja estructura del Sol, para el aprovechamiento de su energía se puede adoptar un modelo mucho más simplificado. Así, se considera el Sol como un cuerpo negro que radia energía a la temperatura de 5780 K, ya que su distribución espectral es muy similar a la de dicho cuerpo negro, para el rango de longitudes de onda típico de los procesos térmicos y fototérmicos.

Desde el punto de vista energético, la masa solar que por segundo se irradia al espacio en forma de partículas de alta energía y de radiación electromagnética es aproximadamente de  $5.6 \times 10^{35}$  GeV (Radiación extraterrestre) y de ella, la Tierra recibe en el exterior de su atmósfera un total de  $1.73 \times 10^{14}$  kW, o sea  $1,366.1 \text{ W/m}^2$ , que se conoce como **constante solar** ( $G_{sc}$ ) y cuyo valor fluctúa en un  $\pm 3\%$  debido a la variación periódica de la distancia entre la Tierra y el Sol.

La atmósfera y la superficie terrestre se encuentran a temperaturas medias distintas y, por lo tanto, también radían energía; así, la longitud de onda de la radiación solar está

comprendida entre,  $0,05 \mu\text{m}$  y  $4 \mu\text{m}$ , mientras que la radiación terrestre lo está entre  $3 \mu\text{m}$  y  $80 \mu\text{m}$ , es decir, se trata de emisiones de onda larga.

Los  $1,73.10^{14}$  kW de energía solar que inciden sobre la Tierra, se reparten en la siguiente forma:

- Energía solar reflejada por la atmósfera hacia el espacio exterior: 30%,  $0,52.10^{14}$  kW
- Energía solar que se utiliza en calentar la atmósfera: 47%,  $0,80.10^{14}$  kW
- Energía solar que se utiliza en la evaporación de los océanos: 23% ,  $0,40.10^{14}$  kW
- Energía solar que se utiliza en generar perturbaciones atmosféricas, como el viento:  $0,0037 .10^{14}$  kW
- Energía solar utilizada en la fotosíntesis:  $0,0004.10^{14}$  kW

De lo anterior se deduce (FIGURA 1.2.6.1 y FIGURA 1.2.6.2) que:

El 47% de la energía solar incidente alcanza la superficie terrestre, de forma que el 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser difundida por el polvo, vapor de agua y moléculas de aire. El resto de la energía solar, el 53%, no alcanza la superficie de la Tierra, ya que:

- Un 15% es absorbida por la troposfera, (agua, ozono y nubes)
- Un 23% es reflejada por las nubes
- Un 7% es reflejada por el suelo
- Un 2% es absorbida por la estratosfera, principalmente por el ozono
- El 6% restante es la energía difundida por la atmósfera que se dirige hacia el cielo

Existen dos fuentes de variación de la radiación solar extraterrestre que deben ser tenidas en cuenta<sup>6</sup>:

6 DUFFIE Y BECKMAN, 1991:

La variación intrínseca de la radiación emitida por el Sol. En la bibliografía se pueden encontrar distintas explicaciones de estas alteraciones, muchas de ellas contradictorias. Debido a esta incertidumbre y a que representan un valor muy pequeño comparado con las variaciones atmosféricas, la energía que emite el Sol puede considerarse constante para aplicaciones de ingeniería.

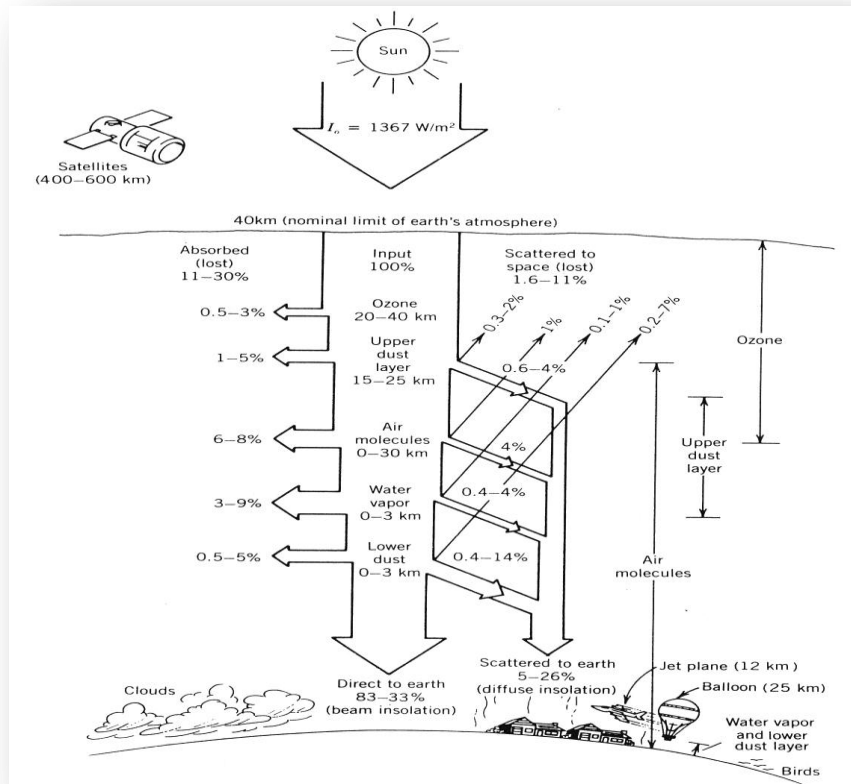


FIGURA 1.2.6.1 Balance de energía solar.

La variación de la distancia Tierra-Sol, sin embargo, ha de tenerse en cuenta, por producir una variación del flujo de radiación en el rango de  $\pm 3\%$ . La dependencia de la radiación extraterrestre con el día del año viene dado por la ecuación 1.2.6.

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{365} \right) \quad (1.2.6).$$

Donde

N es el día del año y  $G_{sc}$  el valor antes dicho de la constante solar, 1.366 kW/m<sup>2</sup>.

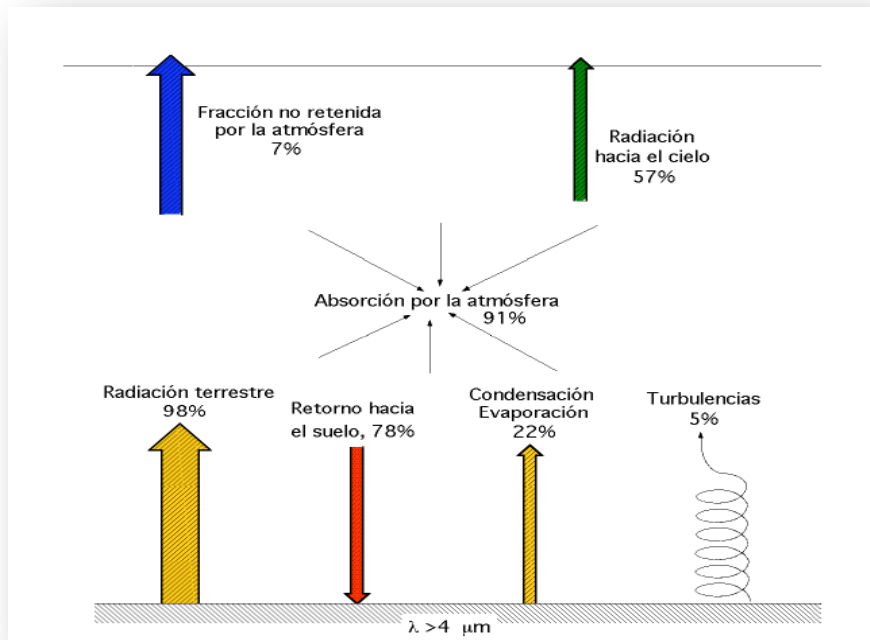


FIGURA 1.2.6.2 Balance de radiación terrestre

En la FIGURA (1.2.6.3) se ha representado la distribución espectral de la radiación extraterrestre y de la radiación a nivel del mar<sup>7</sup>.

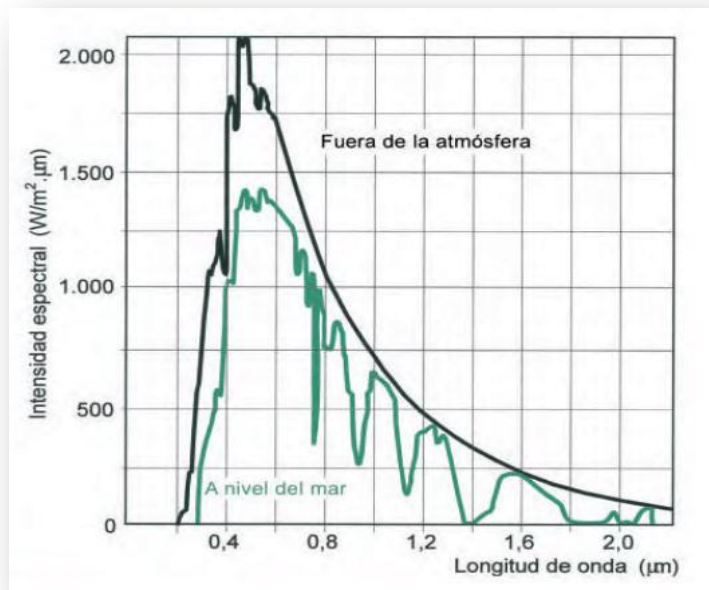


FIGURA 1.2.6.3. Distribución espectral

Al atravesar la capa atmosférica, la radiación va a ser difundida y absorbida, incluso reflejada, por las moléculas en suspensión dentro de la misma, como por ejemplo el vapor de agua condensado en las nubes.

No obstante, como habrá una cierta cantidad de radiación solar que no encontrará obstáculo y otra cantidad que sí, se introducen los siguientes conceptos:

La **radiación directa** es la que se recibe directamente del sol, sin sufrir ninguna dispersión atmosférica. La radiación extraterrestre es por tanto la radiación directa. Suele utilizarse el subíndice “b” para expresar este tipo de radiación

Se conoce como **radiación difusa** a la que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión en la atmósfera; es la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa el cielo se vería negro, aún de día, como sucede por ejemplo en la luna. Esta radiación se expresa utilizando el subíndice “d”.

Por otro lado la **radiación terrestre** (también conocida como radiación de albedo) es la que proviene de objetos terrestres, por ejemplo, lo que refleja una pared blanca, un lago, etc.

La **radiación total** es la suma de las radiaciones directa, difusa y terrestre que se reciben sobre una superficie. Y la radiación total que incide sobre una superficie horizontal, es la llamada **radiación global**, que es igual a la suma de la difusa y la directa.

Como conclusión, se puede afirmar que la radiación total incidente sobre la superficie de la Tierra va a estar sujeta a variaciones, algunas previsibles (diurnas y estacionales) y otras no previsibles (las meteorológicas, particularmente el vapor de agua condensado en las nubes).

Por ello, como se observa en la FIGURA 1.2.6.2 la distribución espectral de la radiación solar a nivel del mar se modifica respecto a la extraterrestre. Estas variaciones son sin duda un problema para la explotación de la energía solar térmica, que puede paliarse en cierta medida con mecanismos de almacenamiento de energía.

Para expresar la potencia solar se utiliza el concepto de “irradiancia”. **La irradiancia** es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie, por unidad de área. Generalmente se usa el símbolo “G” para la irradiancia, junto con los subíndices adecuados: Go, Gb, Gd, para la irradiancia extraterrestre, directa y difusa, respectivamente. Las unidades más comúnmente utilizadas para ésta son  $W/m^2$ .

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 durante un período dado, recibe el nombre de *irradiación*, [ $Jm^{-2}$ ] y no es otra cosa que la integral de la irradiancia durante el período en cuestión. Generalmente se usa el símbolo “I” para la insolación por hora, mientras que “H” se usa para la insolación en el período de un día.

### 1.2.6.2 Parámetros característicos de las superficies reales para el aprovechamiento térmico de la radiación solar.

El fenómeno de transmisión de calor por radiación es sin duda el más importante en el proceso de conversión de la energía solar a energía térmica. No sólo interviene en la energía que llega a la Tierra procedente del Sol, sino también en la transferencia de calor dentro del colector, donde predomina frente a la conducción y a la convección.

Todos los cuerpos, por el hecho de encontrarse a una temperatura determinada, emiten radiación electromagnética, caracterizada a través de la intensidad de radiación,  $I_e$ , que es la velocidad de emisión de energía radiante en una dirección determinada, por unidad de área de la superficie emisora normal a esa dirección, por unidad de ángulo sólido sobre esa dirección, ecuación (1.2.6.1)<sup>8</sup>

$$I_e(\theta, \phi) = \frac{dq}{dA_1 \cdot \cos\theta d\omega} \left( \frac{W}{m^2 sr} \right) \quad (1.2.6.1)$$

A partir de esta definición, se pueden introducir dos conceptos que se emplean a menudo en energía solar, la potencia emisiva de una superficie, E, y la irradiación, G.

Se define la potencia emisiva de una superficie como la velocidad de emisión de energía por unidad de dicha superficie ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

La potencia emisiva total, para el caso de un emisor difuso, es decir, que no tiene direcciones preferenciales, adopta la expresión (1.2.6.2)

$$E = \pi I_e \quad (1.2.6.2)$$

Donde

$I_e$  es la intensidad total ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ ) de la radiación emitida.

Para caracterizar la potencia emisiva utilizamos un parámetro denominado emisividad. La emisividad se define respecto a una superficie ideal, el cuerpo negro, que se caracteriza, entre otras cosas, por ser la superficie que emite más radiación para una temperatura dada. La emisividad de un cuerpo negro admite una expresión analítica sencilla, la ley de Stefan-Boltzmann, tal y como aparece en la ecuación (1.2.6.3)

$$E_b = \sigma T^4 \left( \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) \quad (1.2.6.3)$$

donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann, de valor  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \text{k}^4$ .

La emisividad de una superficie real viene dada, por tanto, por la ecuación (1.2.6.4)

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4} \rightarrow E(T) = \epsilon \sigma T^4 \quad (1.2.6.4)$$

Por otro lado, la irradiación G es el flujo de energía radiante que incide sobre una superficie ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). Es el resultado de las emisiones y reflexiones de otras superficies y comprende la radiación incidente desde todas las direcciones.

La irradiación total, en el caso de radiación difusa incidente se expresa entonces por la ecuación (1.2.6.5)

$$G = \pi I_i \quad (1.2.6.5)$$



En general, esa radiación incidente puede ser reflejada, absorbida o transmitida por el cuerpo, tal y como aparece en la ecuación (1.2.6.6)

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{tr}. \quad (1.2.6.6)$$

La determinación de estas tres componentes es compleja, y depende de las condiciones de la superficie, de la longitud de onda de la radiación y de la composición y espesor del cuerpo.

En lugar de trabajar con los valores absolutos de estas variables, se prefiere manejar proporciones respecto al total. De esta forma, para hablar de la radiación absorbida se empleará la absorbancia, la reflectividad para la cantidad reflejada y la transmisividad para la transmitida.

La absorbancia determina la fracción de la irradiación absorbida por una superficie; la reflectividad, la fracción de la irradiación reflejada por la superficie; y la transmisividad, la fracción de radiación que se transmite a través del medio. Estas definiciones se reflejan en la ecuación (1.2.6.7).

$$\begin{cases} \alpha = \frac{G_{abs}}{G} \\ \rho = \frac{G_{ref}}{G} \\ \tau = \frac{G_{tr}}{G} \end{cases} \quad (1.2.6.7)$$

Para el caso de medios semitransparentes, de las definiciones anteriores y de la ecuación de conservación de la energía se tiene la ecuación (1.2.6.8)

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (1.2.6.8)$$

Y en caso de que el medio sea opaco (como son la mayoría en ingeniería), como se puede suponer que la transmisividad es nula, con lo cual la expresión anterior toma la forma de la ecuación (1.2.6.9)

$$\begin{cases} \tau \approx 0 \\ \rho + \alpha = 1 \end{cases} \quad (1.2.6.9)$$

El cuerpo negro se caracteriza, además de por ser el mayor emisor para una temperatura dada, por absorber toda la radiación incidente, independientemente de la longitud de onda y de la dirección de dicha radiación, tal y como se expresa en la ecuación (1.2.6.10).

$$\alpha = 1 \text{ ó } \rho = 0 \quad (1.2.6.10)$$

Resulta interesante, por último, hacer referencia a la ley de Kirchoff, cuya expresión simplificada es  $\varepsilon = \alpha$ . Dicha expresión será de utilidad al hablar de las superficies selectivas.

Introducidos estos conceptos de transmisión de calor por radiación, se procede a realizar un sencillo cálculo para ver cuál es la temperatura máxima o temperatura de equilibrio radiante,  $T^*$ , que se puede alcanzar en un colector solar básico<sup>9</sup>. Para ello se considera un colector solar de placa plana en el que obviamente no existe concentración de la radiación solar.

La cantidad de energía absorbida por unidad de tiempo, y área viene dada por la ecuación (1.2.6.11)

$$S = \alpha_c G_b \cos \theta_c \quad (1.2.6.11)$$

Donde  $G_b$  es la radiación directa que llega desde el Sol,  $\alpha_c$  es la absorbancia del colector solar y  $\theta_c$  es el ángulo de incidencia del colector, que tiene en cuenta la inclinación de la superficie.

Por otro lado, y de acuerdo con la ecuación (1.2.6.4), la cantidad de energía que emite la superficie, por unidad de tiempo y área, vendrá dada por la ecuación (2.6.12):

$$E(T) = \epsilon_c \sigma T^4 \quad (1.2.6.13)$$

9 CHAPMAN, 1984

Si se admite, como hipótesis muy simplificadora, que la superficie tal no se refrigera por ningún otro medio que no sea la emisión de radiación correspondiente a su propia temperatura, podremos hallar la temperatura en cuestión  $T^*$ , ecuación (1.2.6.14).

$$\varepsilon_c \sigma T^{*4} = \alpha_c G_b \cos \theta_c \rightarrow T^* = \left( \frac{\alpha_c G_b \cos \theta_c}{\varepsilon_c \sigma} \right)^{1/4} \quad (1.2.6.14)$$

Esta sería la máxima temperatura que podría adquirir un panel plano, sin concentración. Una idea para elevar  $T^*$  es usar sustancias con cociente  $(\alpha_c/\varepsilon_c)$  mayor que uno. Son sustancias que absorben bien en el rango visible y mal en el infrarrojo térmico.

Una segunda forma de elevar  $T^*$  es mediante concentración de la radiación solar, pero como ya se ha dicho, sólo se puede concentrar la radiación directa (y una pequeña fracción de la difusa). Ello cabe hacerlo por métodos de reflexión (espejos) o de refracción (lentes). En las aplicaciones fotovoltaicas se emplea más la refracción, en las instalaciones térmicas prácticamente sólo se emplea la reflexión.

### 1.2.7. Clasificación de los colectores solares en función de la razón de concentración

---

Un colector solar es un tipo especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante procedente del Sol en energía térmica. Los colectores se diferencian en varios aspectos de los intercambiadores de calor convencionales. En estos últimos se lleva a cabo normalmente un intercambio de calor fluido a fluido, con altos valores de transferencia de calor, siendo la radiación un fenómeno poco importante. Los colectores solares presentan problemas muy particulares de flujos de energía bajos y variables y gran importancia del fenómeno de radiación.

La mayoría de los estudios sobre aprovechamiento térmico de la radiación solar realizan su análisis partiendo de la clasificación tradicional que distingue entre colectores para aplicaciones de baja, media y alta temperatura<sup>10</sup>.

10 (IBÁÑEZ ET AL., 2005).

En las *aplicaciones solares de baja temperatura* se emplean siempre colectores solares sin concentración, es decir,  $C = 1$ . En este caso, todos los elementos del subsistema solar tienen el mismo emplazamiento físico. En las aplicaciones de temperatura más elevada, dentro del colector distinguimos dos elementos claramente diferenciados, el receptor y el concentrador, con funcionalidades y ubicaciones distintas.

El receptor es el elemento del sistema donde la radiación se absorbe y se convierte en otro tipo distinto de energía; incluye el absorbedor, sus cubiertas asociadas y el aislante.

El concentrador o sistema óptico es la parte del colector que dirige la radiación sobre el receptor. La abertura del concentrador es el espacio abierto a través del cual la radiación solar entra en el colector.

Se pueden encontrar en la bibliografía distintas definiciones de razón de concentración, aunque la más habitual es la de razón de concentración superficial, es decir, la razón entre el área de la apertura del concentrador respecto al área del receptor, ecuación (1.2.7.1)<sup>11</sup>:

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1.2.7.1)$$

Los colectores sin concentración se diseñan para aplicaciones que demandan energía a una temperatura relativamente baja, en general hasta 100 °C, aunque con los tubos de vacío se pueden alcanzar los 130 °C. Aprovechan tanto la radiación directa como la difusa, no requieren un seguimiento de la trayectoria solar y precisan escaso mantenimiento. Además, mecánicamente son bastante más simples que los colectores de concentración. De acuerdo con el último esquema, este tipo de colectores solares se subdivide a su vez en tres grupos, de menor a mayor complejidad técnica:

- Colectores no vidriados.
- Colectores de placa plana.
- Colectores avanzados.

11 WINTER ET AL., 1991

En cuanto a los colectores de concentración, de menor a mayor razón de concentración, se tiene:

- Sistemas cilindro parabólicos.
- Sistemas de torre central.
- Discos parabólicos.

En el presente trabajo se desarrollará el diseño de un deshidratador solar con colector de placa plana, por lo que los análisis serán en torno a este tipo de colector.

### **1.2.7.1 Elementos básicos del colector de placa plana**

---

El colector de placa plana está compuesto por cuatro elementos principalmente: la cubierta transparente, la placa captadora, el aislante y la carcasa.

#### **1. Cubierta transparente:**

Es la encargada de dejar pasar la radiación solar, evitar que el calor emitido por la placa captadora se vaya del sistema y reducir las pérdidas por convección. Estamos logrando el efecto invernadero con una cubierta de vidrio o plástico y de esta forma aumentando la eficiencia del colector.

#### **2. Placa captadora:**

Tiene por misión absorber de la forma más eficiente posible la radiación solar y transformarla en energía térmica utilizable mediante su transferencia al fluido caloportador (agua, aceite, aire, etc.). Existen diferentes modelos, siendo los más usuales:

- a) Dos placas metálicas separadas unos milímetros entre las cuales circula el fluido caloportador.
- b) Placa metálica sobre la cual están soldados o embutidos los tubos por los que circula el fluido caloportador. En lugar de una placa metálica se puede dotar de unas aletas de aluminio a los tubos de cobre.

- c) Dos láminas de metal unidas a gran presión excepto en los lugares que forman el circuito del fluido caloportador.
- d) Placas de plásticos, usadas exclusivamente en climatización de piscinas.

### 3. Aislamiento:

La placa captadora está protegida en su parte posterior y lateral por un aislamiento que evita las pérdidas térmicas hacia el exterior.

Las características de estos aislantes han de ser:

- Resistir altas temperaturas sin deteriorarse, lo que muchas veces se consigue colocando entre la placa y el aislante, una capa reflectante, que impida que el aislante reciba directamente la radiación.
- Desprender pocos vapores al descomponerse por el calor y en caso de ocurrir que no se adhieran a la cubierta.
- No degradarse por el envejecimiento u otro fenómeno a la temperatura habitual de trabajo.
- Soportar la humedad que se pueda producir en el interior de los paneles sin perder sus cualidades.

Los materiales más usados son lana de vidrio, espuma rígida de poliuretano y poliestireno expandido.

### 4. Carcasa:

Es la encargada de proteger y soportar los elementos que constituyen el colector solar, además de servir de enlace con el edificio por medio de los soportes. Debe cumplir los siguientes requisitos:

- Rigidez y resistencia estructural que asegure la estabilidad. Estas cualidades son de suma importancia ya que debe resistir la presión del viento.
- Resistencia de los elementos de fijación: mecánica para los esfuerzos a transmitir, y química para soportar la corrosión.
- Resistencia a la intemperie, a los efectos corrosivos de la atmósfera y a la inestabilidad química debido a las inclemencias del tiempo.
- Aireación del interior del colector para evitar que allí se condense el agua. Se realiza por medio de dos técnicas:
  - Vacío en el interior del colector cuando éste está frío, para que la carcasa no esté sometida a una presión muy alta cuando el aire en su interior se caliente.
  - Practicar unos orificios en la carcasa para permitir la aireación del colector así como la evacuación de la condensación. Los orificios se localizan en la parte posterior para evitar la entrada del agua de lluvia y la pérdida de aire caliente del interior del colector.
- Evitar toda geometría que permita la acumulación de agua hielo o nieve en el exterior del colector.
- Facilitar el desmontaje de la cubierta para poder tener fácil acceso a la placa captadora.<sup>12</sup>

### **1.2.8 Calor y transporte de energía**

---

El transporte de calor es muy familiar dado que es parte de nuestra experiencia diaria, por ejemplo cuando se nos enfría la sopa o el café. Procesos que emplean transporte de calor aparecen frecuentemente también en la industria, En cualquier caso necesitamos hallar la velocidad a la cual ocurre la transferencia de calor para calcular el tamaño del equipo requerido o para mejorar el ya existente.

12 CENTRO URUGUAYO DE TECNOLOGÍAS APROPIADAS

Debemos recordar que el calor es solo una de las formas de la energía y que es esta y no el calor, la que se conserva de acuerdo a la primera ley de la termodinámica. La energía como propiedad se utiliza en termodinámica para ayudar a especificar el estado de un sistema.

La energía se transfiere a través de los límites de un sistema termodinámico en forma de trabajo o de calor.

La transferencia de calor es la expresión usada para indicar el transporte de energía originado en una diferencia de temperatura. La "Velocidad de Transferencia de Calor" o "Flujo de Calor" ( $Q$ , [W] o [Btu/h]), es la expresión de la energía térmica transportada por unidad de tiempo, y "Densidad de Flujo de Calor" o "Flux de Calor" ( $q$ , [ $W/m^2$ ] o [ $Btu/hr.pie^2$ ]), es la velocidad de transferencia de calor por unidad de área.

Existen tres mecanismos diferentes por los cuales ocurre esta transferencia de calor: <sup>13</sup>

- i. **Conducción**, La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo.
- ii. **Convección**, es la transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de mezcla.
- iii. **Radiación**, mecanismo por el que el calor se transfiere directamente entre partes distantes del cuerpo por radiación electromagnética.

Para nuestro caso de estudio, trabajaremos con la transferencia de calor por convección.

El modo de transferencia de calor por convección está compuesto por dos mecanismos, por transferencia de energía debida al movimiento aleatorio molecular (difusión) y, mediante el movimiento global o macroscópico del fluido.

13. DONALD Q. KERN



Si consideramos que tendremos una placa caliente, el flujo del fluido de la superficie calentada es una consecuencia de la interacción fluido-superficie, donde se desarrolla una región en la que la velocidad varia de cero en la superficie, a un valor finito  $u_{\infty}$  asociado con el flujo. Esta región se le conoce como *capa límite hidrodinámica o de velocidad*. Más aún, si las temperaturas de la superficie y el fluido difiere, habrá una región del fluido a través de la cual la temperatura varia de  $T_s$  en  $y=0$  a  $T_{\infty}$  en el flujo exterior.

A la región mencionada anteriormente se le conoce como capa límite térmica, la cual puede ser más grande, del mismo tamaño o más pequeña que aquella a la que varía la velocidad.

La transferencia de calor por convección de acuerdo a su naturaleza se clasifica en *convección forzada*, cuando el flujo es causado por medios externos, como por ejemplo un ventilador, vientos atmosféricos o una bomba; y la *convección libre(o natural)*, que se presenta cuando el flujo es inducido por fuerzas de empuje que surgen a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variación de temperaturas en los fluidos. En el presente trabajo nos concentraremos en la convección libre.

Sin importar la naturaleza particular del proceso de transferencia de calor por convección, la ecuación o modelo apropiado es de la forma:

$$q'' = hA(T_s - T_{\infty}) \quad (1.2.8.1.1)$$

Donde  $q''$ , el flujo de calor por convección, ( $W/m^2$ ), es proporcional a la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del fluido. Esta expresión se le conoce como la *ley de enfriamiento de Newton*, y la constante de proporcionalidad  $h$  se le denomina *coeficiente de transferencia de calor por convección*.

En la convección libre el movimiento de fluido como dijimos anteriormente, se deben a la fuerza de empuje dentro de este. El empuje se debe a la presencia combinada de un gradiente de densidad de densidad del fluido y de una fuerza de cuerpo que es la densidad.

### 1.2.8.1 Ecuaciones de gobierno.

Las ecuaciones que describen la transferencia de momento y energía en la convección libre se originan de los principios de conservación relacionados. Las fuerzas inerciales y viscosas siguen siendo importantes, más las fuerzas de empuje juegan un papel principal.

Consideremos un flujo laminar de capa limite gobernado por fuerzas de flotación, suponemos también condiciones de propiedades constantes bidimensionales estables en las que, la fuerza de gravedad actúa en la dirección  $x$  negativa, suponemos también que el fluido es incompresible y que son válidas las aproximaciones de capa limite.

Ahora considerando la fuerza de flotación que impulsa al flujo y sabiendo que se relaciona con las diferencias de temperatura, tenemos las ecuaciones de conservación de masa (1.2.8.1.2), momento (1.2.8.1.3) y energía (1.2.8.1.4)<sup>14</sup>:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1.2.8.1.2)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g\beta(T - T_{\infty}) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (1.2.8.1.3)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1.2.8.1.4)$$

Donde el *coeficiente de expansión volumétrica*  $\beta$  (ec. 1.2.8.1.5) es una propiedad termodinámica que proporciona una medida de la cantidad por la cual cambia la densidad en respuesta a un cambio en la temperatura a presión constante. Este coeficiente está definido por:

$$\beta \approx -\frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\infty} - \rho}{T_{\infty} - T} \quad (1.2.8.1.5)$$

14. INCROPERA, FRANK P

### 1.2.8.2 Ecuaciones del Movimiento.

*Punto material* (Partícula): Cuerpo cuyas dimensiones pueden despreciarse cuando se describe su movimiento.

La posición de un punto material en el espacio está determinada por su vector de posición  $\mathbf{r}$ , cuyas componentes coinciden con sus coordenadas  $x, y, z$ . (*coordenadas cartesianas*)

*Velocidad*: Es la derivada de  $\mathbf{r}$  con respecto al tiempo (Ec. 1.2.8.2.1). En lo sucesivo, indicaremos la derivación con respecto del tiempo por medio de un punto sobre la letra:  $\mathbf{v} = \dot{\mathbf{r}}$

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \quad (1.2.8.2.1)$$

*Aceleración del punto*: Derivada de la velocidad.

$$\frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{a} \quad (1.2.8.2.2)$$

Para determinar la posición de un sistema de  $N$  puntos materiales en el espacio, hace falta dar  $N$  vectores de posición. El número de magnitudes independientes que determinan de manera unívoca la posición de un sistema se llama *número de grados de libertad* del sistema. Estas magnitudes no son necesariamente las coordenadas cartesianas del punto, y de las condiciones del problema, depende la elección de otro sistema más cómodo de coordenadas.  $s$  magnitudes cualesquiera  $q_1, q_2, \dots, q_s$  que definen completamente la posición de un sistema (de  $s$  grados de libertad) se llaman sus *coordenadas generalizadas* y las derivadas  $\dot{q}_i$ , sus *velocidades generalizadas*.

Matemáticamente, dadas las coordenadas y las velocidades en un cierto instante, quedan definidas unívocamente las aceleraciones  $\ddot{q}_i$  en ese instante.

Las relaciones entre las aceleraciones, las coordenadas y las velocidades se llaman *ecuaciones de movimiento*.

### 1.2.8.2.1. Ecuaciones de transformación

Sea el vector de posición  $\mathbf{r}_v = x_v \mathbf{i} + y_v \mathbf{j} + z_v \mathbf{k}$ , de la partícula  $v$ th con respecto al sistema coordenado  $xyz$ . Las relaciones de coordenadas generalizadas a las coordenadas de posición se les conocen como ecuaciones de transformación (1.2.8.2.1.1).

$$\left. \begin{aligned} x_v &= x_v(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \\ y_v &= y_v(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \\ z_v &= z_v(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \end{aligned} \right\} \quad (1.2.8.2.1.1)$$

donde  $t$  representa el tiempo. En forma de vector se escribe (1.2.8.2.1.2):

$$\mathbf{r}_v = \mathbf{r}_v(q_1, q_2, \dots, q_n, t) \quad (1.2.8.2.1.2)$$

### 1.2.8.3 El principio de la mínima acción

*El principio de la mínima acción* (o principio de Hamilton): Este principio nos dice que todo sistema mecánico está caracterizado por una función definida:

$$L(q_1, q_2, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_s, t),$$

O más brevemente  $L(q, \dot{q}, t)$ , y el movimiento del sistema satisface la siguiente condición:

Supongamos que en los instantes  $t=t_1$ , y  $t=t_2$  el sistema ocupa posiciones dadas, caracterizadas por los dos conjuntos de valores de las coordenadas  $q$ ; el sistema se mueve entre estas posiciones de manera que la integral

$$s = \int_{t_1}^{t_2} L(q, \dot{q}, t) dt \quad (1.2.8.3.1)$$

Tome el menor valor posible. La función  $L$  se llama *Lagrangiana* del sistema, y la integral (1.2.8.3.1), *acción*. Conociendo la Lagrangiana se obtiene el estado mecánico del sistema, es decir, sus ecuaciones de movimiento.<sup>15</sup>

Para la energía cinética se tiene

$$T = Fdq = m dv \frac{dq}{dt} \int_A^B m v dv = \frac{1}{2} m v_B^2 - \frac{1}{2} m v_A^2 \quad (1.2.8.3.2)$$

para el estado inicial y final, por lo que, en general se puede escribir

$$T = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.2.8.3.3)$$

o bien

$$T = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^N m_v \dot{\mathbf{r}}_v^2 \quad (1.2.8.3.4)$$

Si  $W$  es el trabajo total realizado en un sistema de partículas por las fuerzas  $\mathbf{F}_v$  que actúa sobre la partícula  $v$ th, entonces

$$dW = \sum_{\alpha=1}^n \Phi_{\alpha} dq_{\alpha} \quad (1.2.8.3.5)$$

$$\Phi_{\alpha} = \sum_{v=1}^N \mathbf{F}_v \frac{\partial \mathbf{r}_v}{\partial q_{\alpha}} \quad (1.2.8.3.6)$$

y  $\mathbf{F}_v$  se llama la fuerza generalizada asociada a las coordenadas generalizadas  $q_{\alpha}$

#### 1.2.8.4 Ecuaciones de Lagrange.

La fuerza generalizada está relacionada con la energía cinética mediante la ecuación  
1.2.8.4.1

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_{\alpha}} = \Phi_{\alpha} \quad (1.2.8.4.1)$$

Si el sistema es conservativo de modo que, las fuerzas son derivables de un potencial o una *energía potencial*  $V$ , se puede escribir como

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_\alpha} = 0 \quad (1.2.8.4.2)$$

donde  $L = T - V \quad (1.2.8.4.3)$

Las ecuaciones 1.2.8.4.1 y las 1.2.8.4.2 son llamadas *ecuaciones de Lagrange*.

Si se define

$$p_\alpha = \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_\alpha} \quad (1.2.8.4.4)$$

Llamado momento generalizado asociado con las coordenadas generalizadas  $q_\alpha$ , y si el sistema es conservativo dependiendo la energía potencial solo de las coordenadas generalizadas, entonces se puede escribir en términos de la Lagrangiana  $L=T-V$  como

$$p_\alpha = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_\alpha} \quad (1.2.8.4.5)$$

### 1.2.8.5. Ecuaciones de Hamilton

---

La formulación de las leyes de la mecánica con la ayuda de la Lagrangiana, presupone que el estado mecánico del sistema está determinado dando sus coordenadas y velocidades generalizadas. Sin embargo este no es el único método posible; la descripción del estado de un sistema en función de sus coordenadas e ímpetus generalizados presenta un cierto número de ventajas, entonces debemos deducir las ecuaciones de movimiento correspondientes.

El *Hamiltoniano*, simbolizado por  $H$ , está definido en términos del Lagrangiano  $L$  y es:

$$H = \sum_{\alpha=1}^n p_\alpha \dot{q}_\alpha - L \quad (1.2.8.5.1)$$

que esta expresado en coordenadas generalizadas  $q_\alpha$  y en momentos generalizados  $p_\alpha$ . Entonces, la Hamiltoniana se puede expresar como sigue:

$$H(p_1, \dots, p_n, q_1, \dots, q_n, t) \quad (1.2.8.5.2)$$

o simplemente  $H(p_\alpha, q_\alpha, t)$  y es llamado el Hamiltoniano del Sistema.

De la ecuación  $dH = -\sum p_\alpha \dot{q}_\alpha + \sum q_\alpha \dot{p}_\alpha$  en la cual las variables independientes son las coordenadas y los momentos, se obtienen las ecuaciones (1.2.8.5.3) y (1.2.8.5.4.)

$$\dot{p}_\alpha = -\frac{\partial H}{\partial q_\alpha} \quad (1.2.8.5.3)$$

$$\dot{q}_\alpha = \frac{\partial H}{\partial p_\alpha} \quad (1.2.8.5.4)$$

Las ecuaciones (1.2.8.5.3) y (1.2.8.5.4.) son llamadas ecuaciones canónicas de Hamilton a causa de su sencillez y simetría.

Si el sistema es conservativo, La Hamiltoniana puede ser interpretada como la energía total del sistema (cinética y potencial)

$$\mathbf{H}=\mathbf{T}+\mathbf{V} \quad (1.2.8.5.3)$$

### 1.2.8.6 La ecuación de Hamilton-Jacobi.

Al considerar la acción  $S$  como función de las coordenadas y del tiempo se sabe que la derivada parcial respecto al tiempo de esta función  $S(q,t)$  está relacionada con la Hamiltoniana por la expresión

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H(p_\alpha, q_\alpha, t) = 0 \quad (1.2.8.6.1)$$

y que las derivadas parciales con respecto a las coordenadas son los momentos, sustituyendo entonces en la Hamiltoniana los momentos  $p$  por las derivadas  $\partial S / \partial q$ , se obtiene la ecuación

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H\left(\frac{\partial S}{\partial q_\alpha}, q_\alpha, t\right) = 0 \quad (1.2.8.6.2)$$

Esta ecuación es llamada la ecuación de Hamilton-Jacobi.

Para lograr nuestros objetivos tenemos que encontrar una solución adecuada para la ecuación de Hamilton-Jacobi. Ahora bien, como esta ecuación contiene un total de  $n + 1$  variables independientes  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , y  $t$ , obtenemos una solución llamada *solución completa.*, que implica  $n+1$  constantes. Omitiendo y agregando una constante arbitraria y denotando el residuo  $n$  constantes por  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ , esta solución se puede escribir como

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}(q_1, q_2, \dots, q_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n, t) \quad (1.2.8.6.3)$$

Cuando esta solución se obtiene entonces podemos determinar las viejas coordenadas del momento

$$p_\alpha = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial q_\alpha} \quad (1.2.8.6.4)$$

También, si identificamos las nuevas coordenadas del momento  $P_\alpha$  como las constantes  $\beta_\alpha$ , entonces

$$Q_\alpha = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \beta_\alpha} = \gamma_\alpha \quad (1.2.8.6.5)$$

donde  $\gamma_\alpha, \alpha=1, \dots, n$  son constantes

Usando las ecuaciones anteriores se puede encontrar  $q_\alpha$  como función de  $\beta, \gamma$  y  $t$ , que da el movimiento del sistema.

Si obtenemos una solución completa de la ecuación de Hamilton-Jacobi, es muy útil asumir una solución de la forma

$$\mathcal{S} = \mathcal{S}(q_1) + \mathcal{S}(q_2) + \dots + \mathcal{S}(q_n) + F(t) \quad (1.2.8.6.6)$$

Donde cada función a la derecha de la igualdad depende solo de una variable, este método es llamado el método de *separación de variables*, y es usado cuando el Hamiltoniano no depende explícitamente del tiempo. Entonces  $F(t) = -Et$  y si la parte independiente del tiempo de  $\mathcal{S}$  denotado por



$$\mathcal{S} = \mathcal{S}(q_1) + \mathcal{S}(q_2) + \dots + \mathcal{S}_n(q_n) \quad (1.2.8.6.7)$$

La ecuación de Hamilton-Jacobi se reduce a

$$H\left(\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial q_\alpha}, q_\alpha\right) = E \quad (1.2.8.6.8)$$

donde la E representa la energía total del sistema.

La ecuación (2.8.6.8) se puede obtener directamente si asumimos que la función generadora  $\mathcal{S}$  es independiente del tiempo. Entonces tenemos<sup>16</sup>

$$p_\alpha = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial q_\alpha}, \quad Q_\alpha = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial P_\alpha}, \quad \mathcal{H} = H = E$$

donde  $\dot{P}_\alpha = -\frac{\partial H}{\partial Q_\alpha}, \quad \dot{Q}_\alpha = \frac{\partial H}{\partial P_\alpha}$

16. MURRAY R. SPIEGEL

---

# CAPÍTULO II

---

## MATERIALES Y MÉTODOS

---

En el presente capítulo se encuentra la secuencia para la estimación de radiación solar en superficies, la ubicación, así como la caracterización del lugar de trabajo. También cuenta con información del recurso solar energético disponible para las coordenadas 20° 29' latitud norte, 99° 13' longitud oeste. Este capítulo trata brevemente las tecnologías de captación solar térmica, en especial la tecnología de captación solar de placa plana, los elementos que la componen y el análisis térmico necesario para la obtención del calor útil, a partir de la radiación solar incidente y reflejada, así como la eficiencia y la estimación de pérdidas térmicas en el colector. Al final del capítulo tenemos un caso práctico para el Valle del Mezquital.

## 2.1. ESTIMACIÓN DE RADIACIÓN SOLAR EN EL VALLE DE LA MUERTE

### 2.1.1. Secuencia para la estimación de radiación solar en superficies.

Para obtener la radiación en alguna superficie, primeramente hay que ubicar nuestro lugar de trabajo, así como la latitud y la longitud, los datos meteorológicos de dicho lugar; tal es el caso de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, días nublados, y desde luego la radiación solar.

Debido a que, la radiación tiene variantes dependiendo del día del año y la hora, se tiene que hacer una serie de cálculos de geometría solar, la posición correcta del colector permitirá tener la máxima eficiencia posible del mismo. En la figura 2.1.1.1 se observan los pasos a seguir para poder obtener la radiación solar para colectores inclinados.

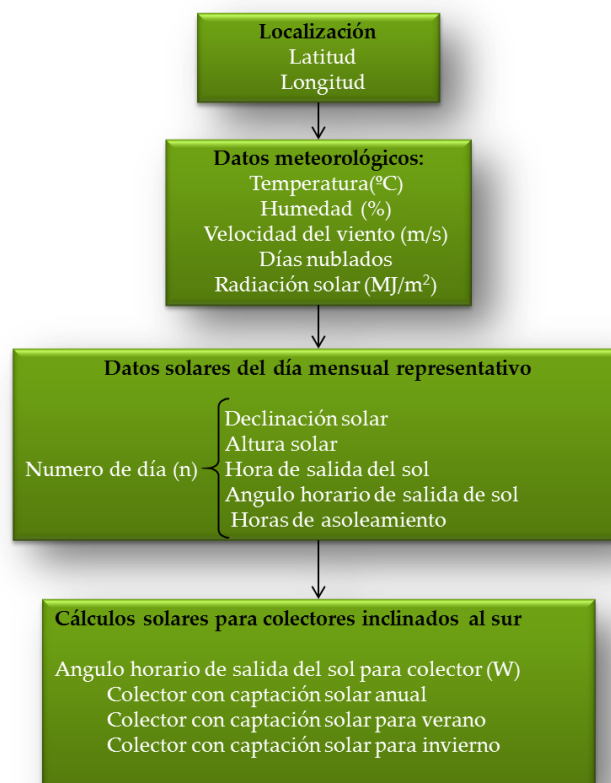


Fig. 2.1.1.1. Secuencia para la estimación solar en superficies.

En la Figura 2.1.1.2 se tiene la secuencia para obtener la radiación global diaria en planos inclinados. Recordando que a partir de la constante solar, se pueden obtener la radiación extraterrestre, la radiación directa, difusa y global. Es necesario también tener datos como el índice de claridad y la radiación diaria reflejada por el suelo hacia el plano inclinado.

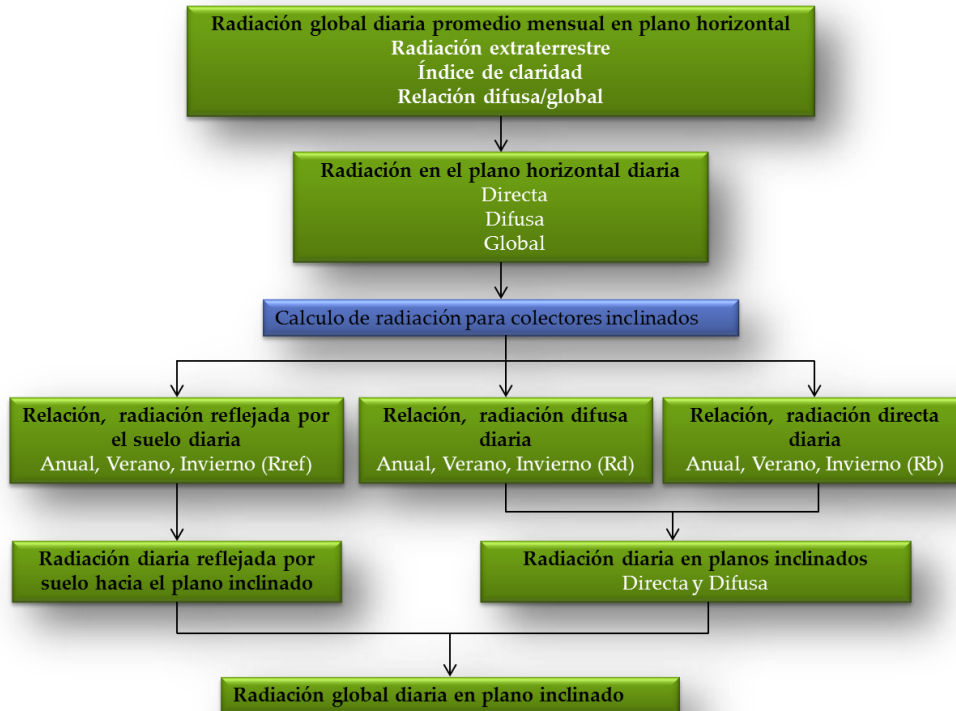
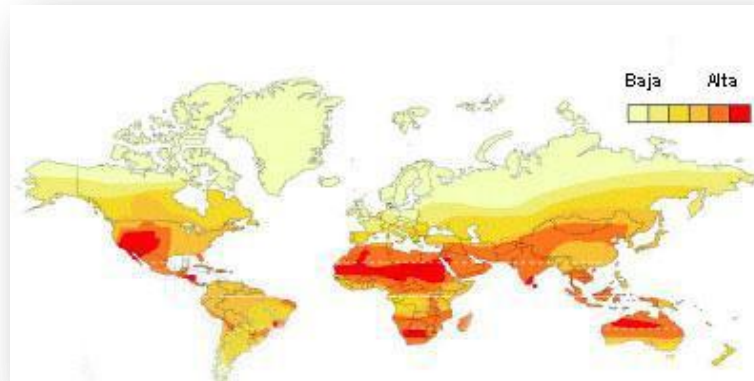


Fig. 2.1.1.2 secuencia para obtener la radiación global diaria en planos inclinados

las del fluido caloportador, se podrá estimar el calor útil que podemos usar para el proceso de deshidratación.

### 2.1.1.1. Disponibilidad del recurso solar en México

México está situado entre los paralelos 14 y 32 de latitud norte, se encuentra entre los países latinos más favorecidos por la radiación solar como se puede observar en la figura 2.1.1.1.1 por tanto, con mayores posibilidades de aprovechamiento de esta fuente de energía.



#### 2.1.1.1.1 Zonas con mayor disponibilidad de Energía Solar <sup>17</sup>

La mayor parte de México cuenta con un potencial considerable de energía para su utilización como energía útil, en la figura 2.1.1.2, se muestra el potencial de horas pico para las diferentes zonas de México. Se puede observar que el Valle del Mezquital es de las zonas con mayor potencia, del orden de 5 horas pico de insolación.

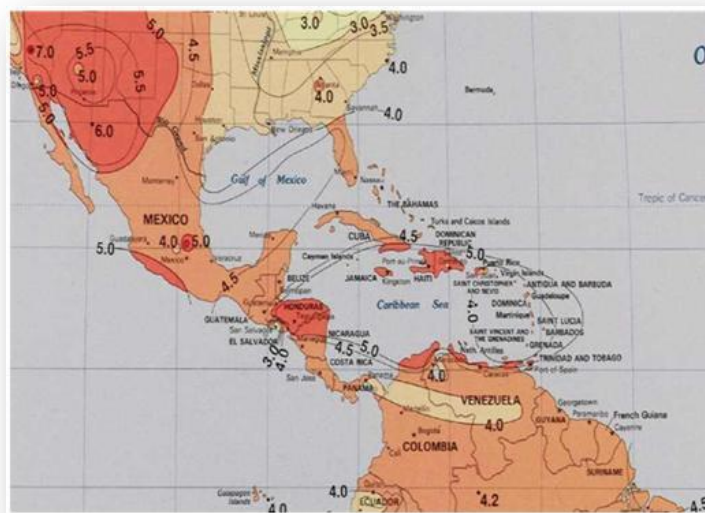


Figura 2.1.1.2: Horas pico de energía disponible en la República Mexicana <sup>18</sup>

<sup>17</sup> WWW.OKSOLAR.COM

<sup>18</sup> WWW.NASA.GOV

## 2.1.2 Ubicación del lugar de trabajo.

### 2.1.2.1. Ixmiquilpan, en el Valle de la Muerte.

Ixmiquilpan, “Pueblo situado sobre los cultivos de hierba cuyas hojas tienen la forma de navaja” en idioma nahua, está ubicado en la zona semidesértica del Valle del Mezquital, antes llamado el Valle de la Muerte, en el estado de Hidalgo (figura 2.1.2.1). El municipio de Ixmiquilpan colinda al norte con los municipios de Zimapán, Nicolás Flores y Cardonal; al este con Cardonal y Santiago de Anaya; al sur con Santiago de Anaya, San Salvador, Chilcuautla y Alfajayucan y al oeste con Alfajayucan, Tasquillo y Zimapán.<sup>19</sup>



Figura 2.1.2.1 Ubicación de Ixmiquilpan Hgo.

La ciudad de Ixmiquilpan tiene las siguientes coordenadas geográficas, **20° 29' latitud norte, 99° 13' longitud oeste** y se encuentra ubicado a 1,700 metros sobre el nivel del mar (msnm). El municipio cuenta con una superficie de 565.3 kilómetros cuadrados, lo cual Representa el 2.7% de la superficie del Estado.

19 . INSTITUTO NACIONAL PARA EL FEDERALISMO Y EL DESARROLLO MUNICIPAL, GOBIERNO DEL ESTADO DE HIDALGO © 2005

### **2.1.2.2. Características climáticas del valle del Mezquital.**

---

El municipio presenta un clima semiseco templado en la mayor parte de la superficie municipal, que representa un 51.22%, además existe un clima seco semicálido en un 23.67% y templado subhúmedo con lluvias en verano de 21.58%. El restante tiene un clima semiseco semicálido.

La temperatura promedio para los meses de diciembre y enero que son los más fríos del año oscila entre los 14.5°C y durante los meses de mayo y junio que son las temperaturas más altas registra un promedio de 21.4°C. La estación meteorológica de la ciudad de Ixmiquilpan tras 53 años de observación ha estimado que la temperatura anual promedio en el municipio es de aproximadamente 18.5°C.

Con respecto a la precipitación anual en el municipio, el nivel promedio observado es de alrededor de los 363.8 mm. Según datos observados desde hace más de 50 años, siendo los meses de junio y septiembre los de mayor precipitación y los de febrero y diciembre los de menor.

### **2.1.3 Caracterización de la energía solar para la latitud 20.49 y longitud -99.21.**

---

La intensidad de energía utilizable una vez que la radiación solar atraviesa la atmósfera es muy baja, y su utilización está condicionada por la temperatura a la cual se va a aprovechar.

El aprovechamiento de la energía solar depende de tres factores:

- La intensidad de la luz: Cuanto mayor sea su intensidad, mayor será su aprovechamiento. La intensidad de la luz depende de factores como la época del año, el momento del día, la latitud y la altitud.

- La calidad de la luz: Esta depende de la longitud de onda, siendo el espectro de la luz blanca el más aprovechable.

- El fotoperiodo: Son los periodos de luz y de oscuridad. Los ecosistemas que disponen de poca luz solar tal como ocurre durante el invierno en el Norte son menos productivos que aquellos donde la luz y la oscuridad no ofrecen estas variaciones.

La utilización de la energía está determinada por una serie de parámetros, en los que destacan primeramente la geometría solar y la cantidad de radiación que absorbe un colector. Para obtener la información de la geometría solar serán necesarios contar con la fecha en que deseamos estimar la radiación, las coordenadas, así como la hora civil y ángulos de inclinación del colector.

Por ejemplo para la **latitud 20.49 y longitud -99.21** (que es la ubicación donde pondremos el colector), el 7 de mayo, a las 11:25 AM (hora civil) y con ángulos de superficie y azimutal de cero; a partir de la tabla 1.2.4.1 obtenemos que es el día juliano número 127, si asignamos una longitud estándar de 90 y utilizando las ecuaciones (1.2.4.3), (1.2.5.2), (1.2.5.5), (1.2.5.3), (1.2.5.4), (1.2.5.6), (1.2.5.9) y (1.2.5.7) respectivamente, obtenemos la tabla 2.1.3.1:

Día Juliano	127	
Tiempo Solar Verdadero	10:51	HORAS
Angulo de Declinacion	16.68835	GRADOS
Angulo Horario	-17	GRADOS
Altura Solar	73.45427	GRADOS
Angulo Azimutal	-79.5502	GRADOS
Angulo de Incidencia	16.54573	GRADOS
Longitud del Dia	12.85763	HORAS
Maxima altura solar del Dia	86.19835	GRADOS

Tabla 2.1.3.1. Datos de geometría solar para el lugar de trabajo el día 7 de mayo a las 11:25 AM

La constante solar, es la energía que proviene del sol por unidad de tiempo que incide sobre una unidad de área sobre una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la redición solar a una distancia media entre el sol y la tierra ( $G_{sc} = 1366.1 \text{ W/m}^2$ ), así entonces podemos calcular la radiación extraterrestre para cualquier día del año con la ecuación 2.1.3.1

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{365} \right) \quad (2.1.3.1)$$



Para una superficie horizontal, se calcula con la ecuación 2.1.3.2

$$G_{oH} = G_{on} \cos \phi = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360N}{365} \right) [\cos L \cos \delta \cos h + \sin L \sin \delta] \quad (2.13.2)$$

E integrada por día se obtiene la ecuación 2.1.3.4

$$H_o = \frac{24 * 3600}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \left[ \cos L \cos \delta \sin h_{ss} + \left( \frac{\pi h_{ss}}{180} \right) \sin L \sin \delta \right] \quad (2.1.3.4)$$

Integrada por hora (Ec. 3.35)

$$I_o = \frac{12 * 3600}{\pi} G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360N}{365} \right) \right] \left[ \cos L \cos \delta \sin(h_2 - h_1) + \left( \frac{\pi(h_2 - h_1)}{180} \right) \sin L \sin \delta \right] \quad (2.1.3.5)$$

El factor de claridad lo define la ecuación 2.1.3.6:

$$\overline{Kt} = \frac{\overline{H}}{H_o} \quad (2.1.3.6)$$

La radiación directa sobre una superficie inclinada está dada por (2.1.3.7)

$$I_b = G_{Bt} = G_{Bn} \cos \theta \quad (2.1.3.7)$$

Con las ecuaciones anteriores (de la 2.1.3.1 a la 2.1.3.7) podemos obtener la radiación, más la información será solo para la hora que se indique al inicio.

Para obtener la radiación utilizable en el valle de la muerte es necesario, primeramente obtener una base de datos climatológicos anuales, donde además de tener temperaturas, humedad y velocidad del viento, será indispensable obtener la radiación solar disponible en la localidad a cualquier hora y en cualquier fecha.

Para obtener la estimación de la energía solar en el valle, se utilizó el software METEONORM, que es una referencia meteorológica comprensible; que incorpora un catálogo de datos meteorológicos y procedimientos de cálculo para aplicaciones solares y diseño de sistemas para cualquier localidad en el mundo. Varias bases de datos de diferentes partes del planeta han sido combinadas y verificada su confiabilidad. En la versión actual, la mayoría de los datos se han tomado de GEBA (Global Energy Balance Archive), de la Organización Meteorológica Mundial (WMO/OMM) Normales Climatológicas 1961–1990 y de la base de datos Suiza compilada por MeteoSwiss.<sup>20</sup>

Entonces, ubicando Ixmiquilpan en el METEONORM tenemos (FIGURA 2.1.3.1):

Mes	H_Gh	H_Dh
Ene.	126	56
Feb.	141	46
Mar.	166	70
Abr.	200	69
Mayo	190	81
Jun.	188	79
Jul.	179	85
Ago.	166	74
Sept.	141	78
Oct.	140	67
Nov.	114	53
Dic.	124	50
<b>Año</b>	<b>1875</b>	<b>808</b>

FIGURA 2.1.3.1 Obtención de datos de radiación con METEONORM

Introduciendo la ubicación, e interpretando los datos con ayuda de TRNSYS y de Excel, se obtiene la radiación promedio diaria para planos horizontales, en el eje vertical aparece la radiación medida en  $W/m^2$  y en el eje horizontal los días del mes.

Para el mes de enero se tiene (FIGURA 2.1.3.2):

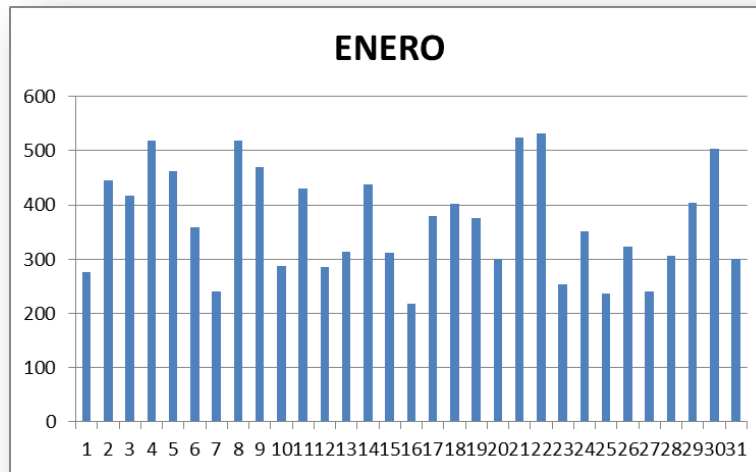


FIGURA 2.1.3.2. Radiación correspondiente al mes de enero para plano horizontal

Para el mes de febrero (FIGURA 2.1.3.3):

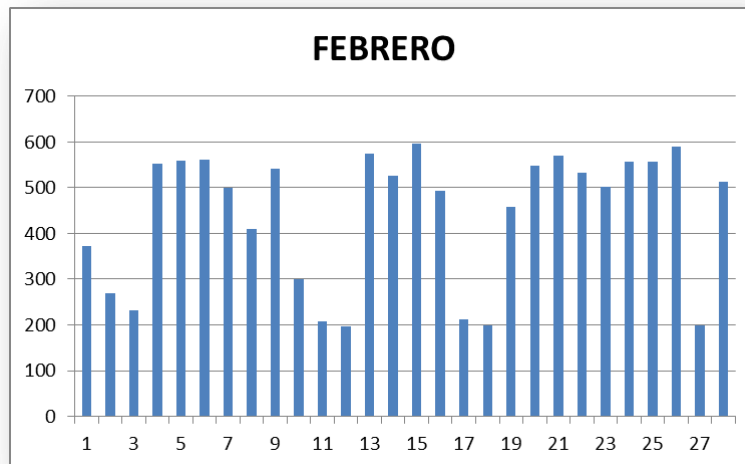


FIGURA 2.1.3.3. Radiación correspondiente al mes de febrero para plano

Para el mes de Marzo (FIGURA 2.1.3.4):

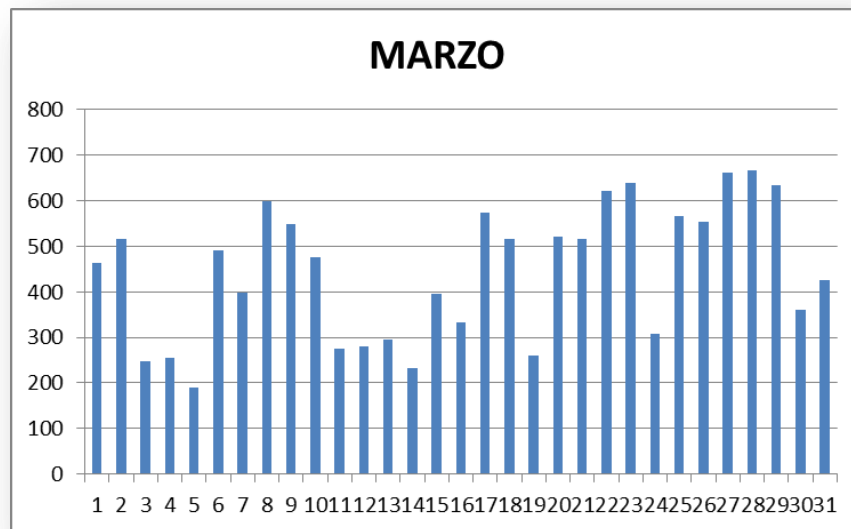


FIGURA 2.1.3.4. Radiación correspondiente al mes de Marzo para plano

Para el mes de Abril (FIGURA 2.1.3.5):

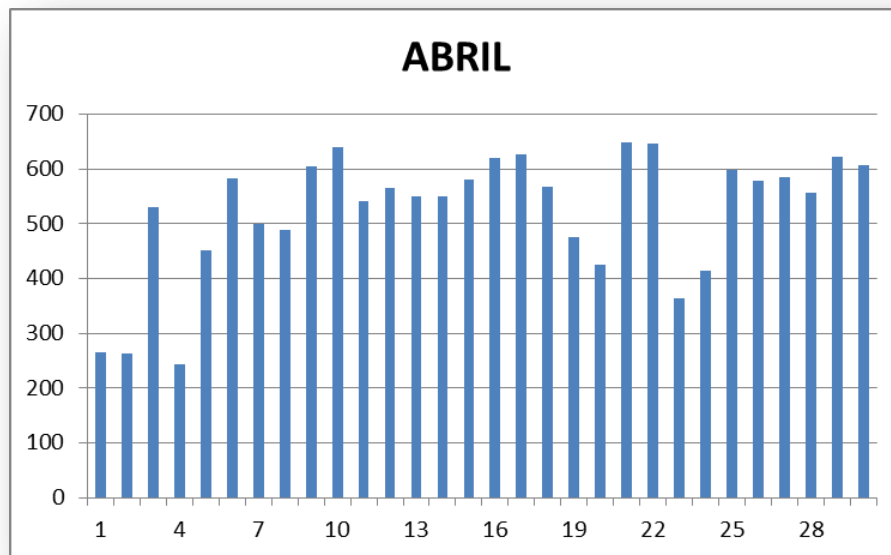


FIGURA 2.1.3.5. Radiación correspondiente al mes de abril para plano horizontal

Para el mes de Mayo (FIGURA 2.1.3.6):

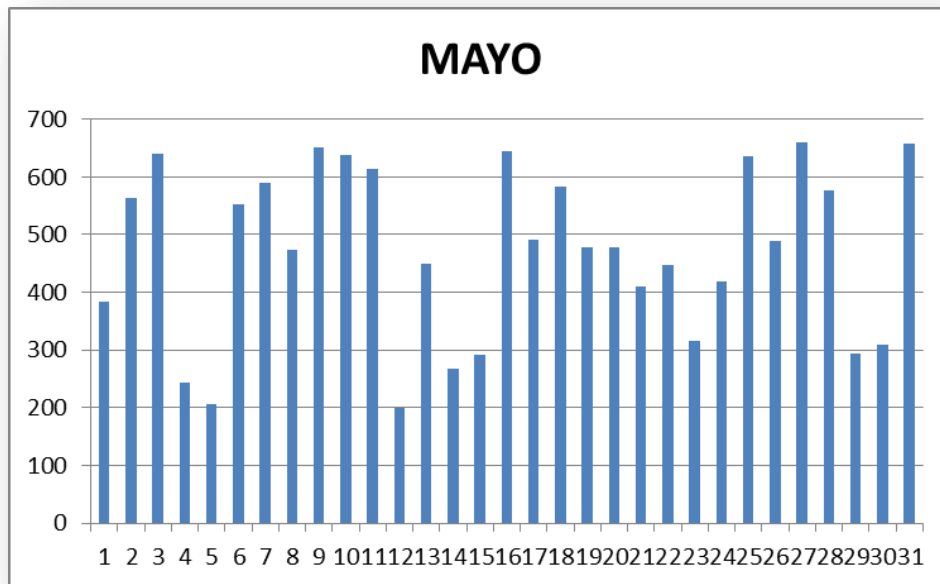


FIGURA 2.1.3.6. Radiación correspondiente al mes de Mayo para plano

Para el mes de Junio (FIGURA 2.1.3.7):

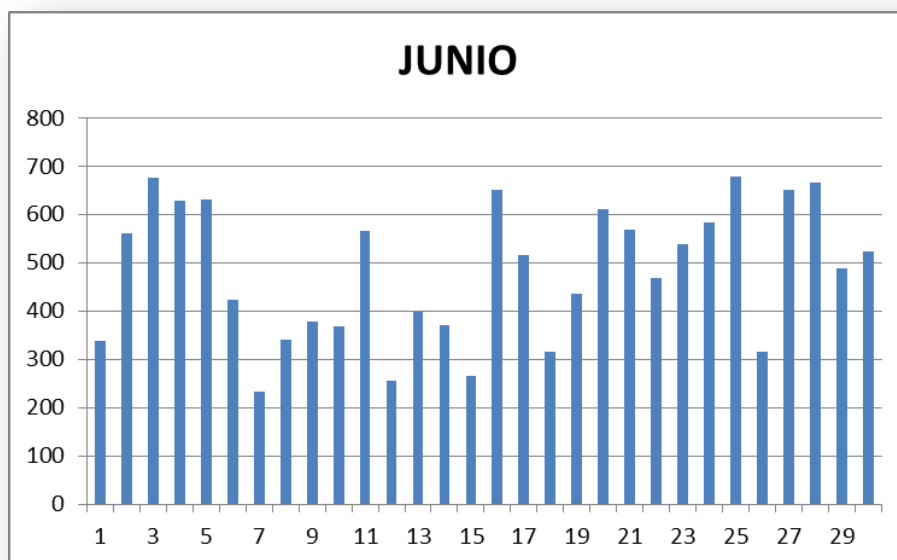


FIGURA 2.1.3.7. Radiación correspondiente al mes de Junio para plano horizontal

Para el mes de Julio (FIGURA 2.1.3.8):

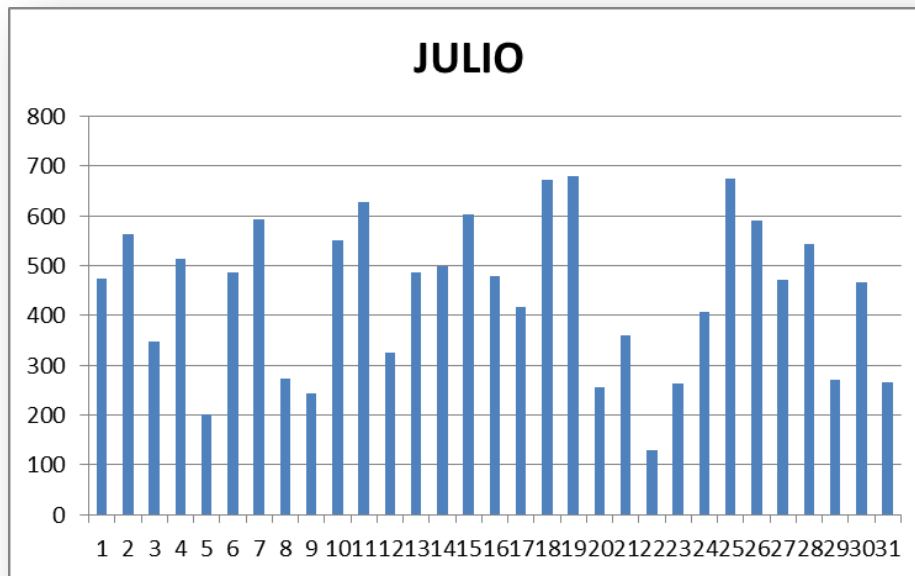


FIGURA 2.1.3.8. Radiación correspondiente al mes de Julio para plano horizontal

Para el mes de Agosto (FIGURA 2.1.3.9):

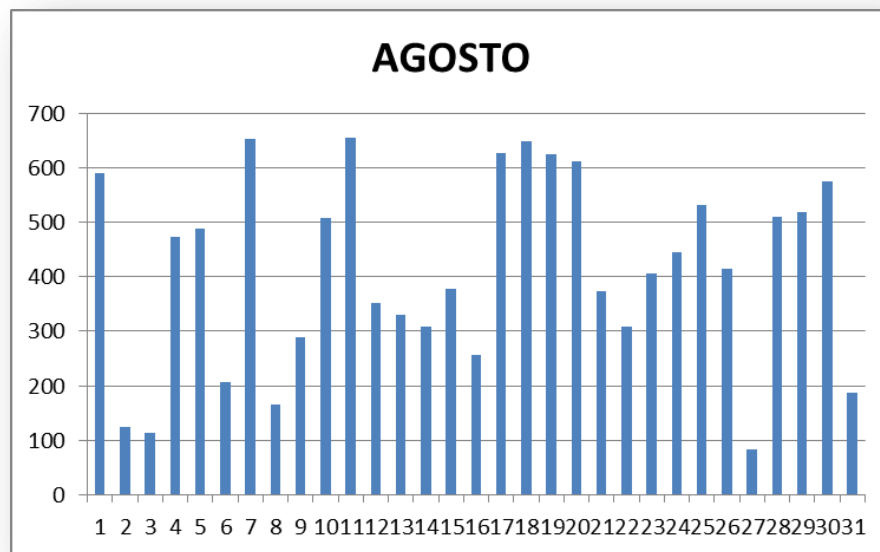


FIGURA 2.1.3.9. Radiación correspondiente al mes de Agosto para plano

Para el mes de Septiembre (FIGURA 2.1.3.10):

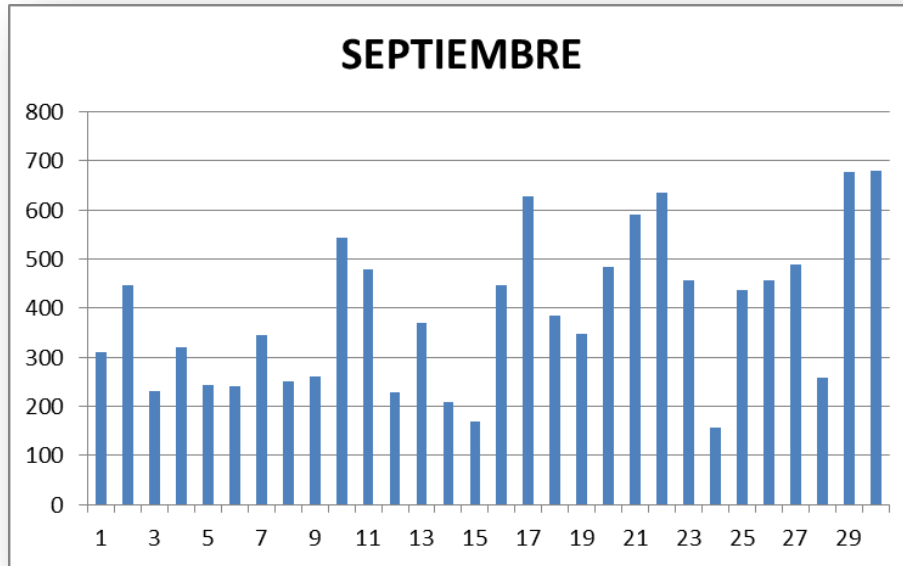


FIGURA 2.1.3.10. Radiación correspondiente al mes de Septiembre para plano horizontal

Para el mes de Octubre (FIGURA 2.1.3.11):

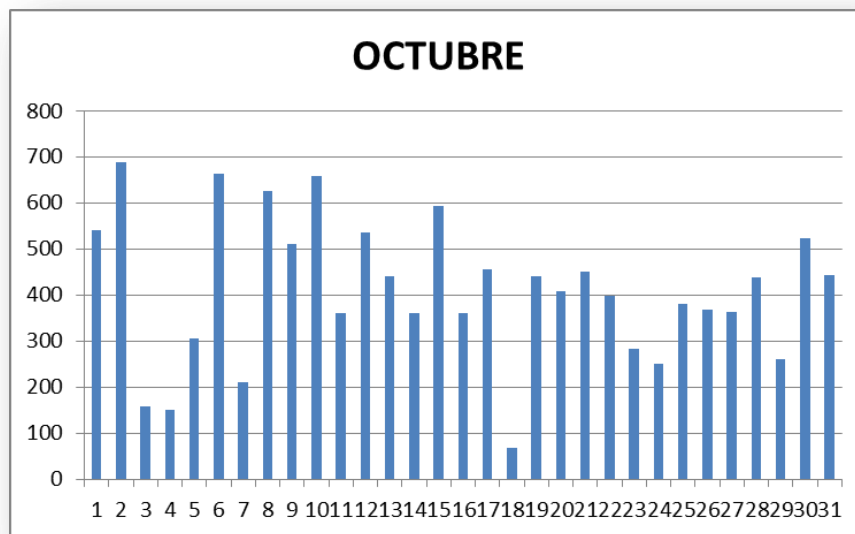


FIGURA 2.1.3.11. Radiación correspondiente al mes de octubre para plano horizontal

Para el mes de Noviembre (FIGURA 2.1.3.12):

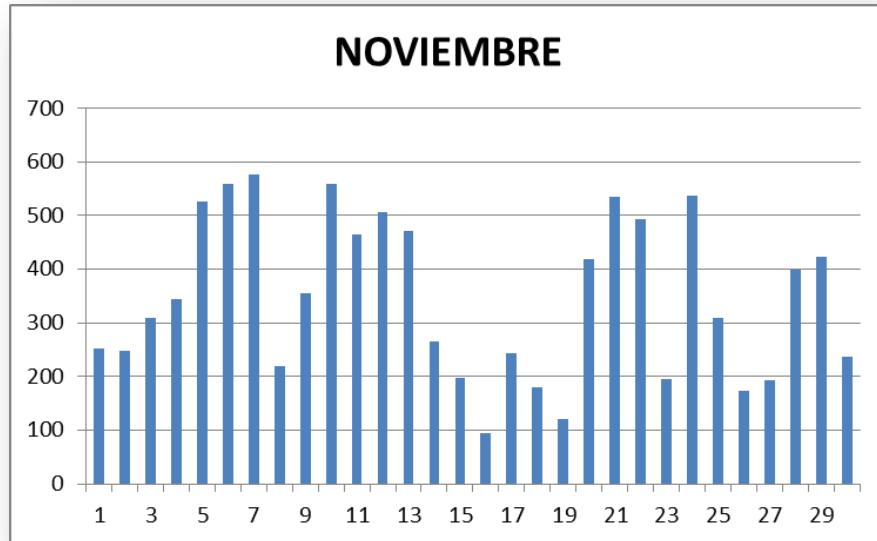


FIGURA 2.1.3.12. Radiación correspondiente al mes de Noviembre para plano horizontal

Para el mes de Diciembre (FIGURA 2.1.3.13):

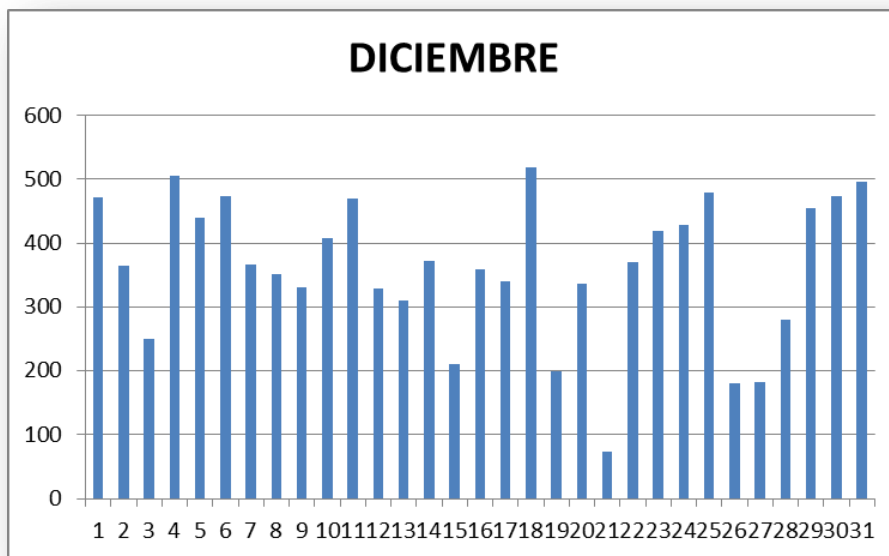


FIGURA 2.1.3.13. Radiación correspondiente al mes de Diciembre para plano horizontal



De los datos anteriores se obtiene la radiación por año en el Valle del Mezquital, entonces, a partir de un plano horizontal (Figura 2.1.3.14):

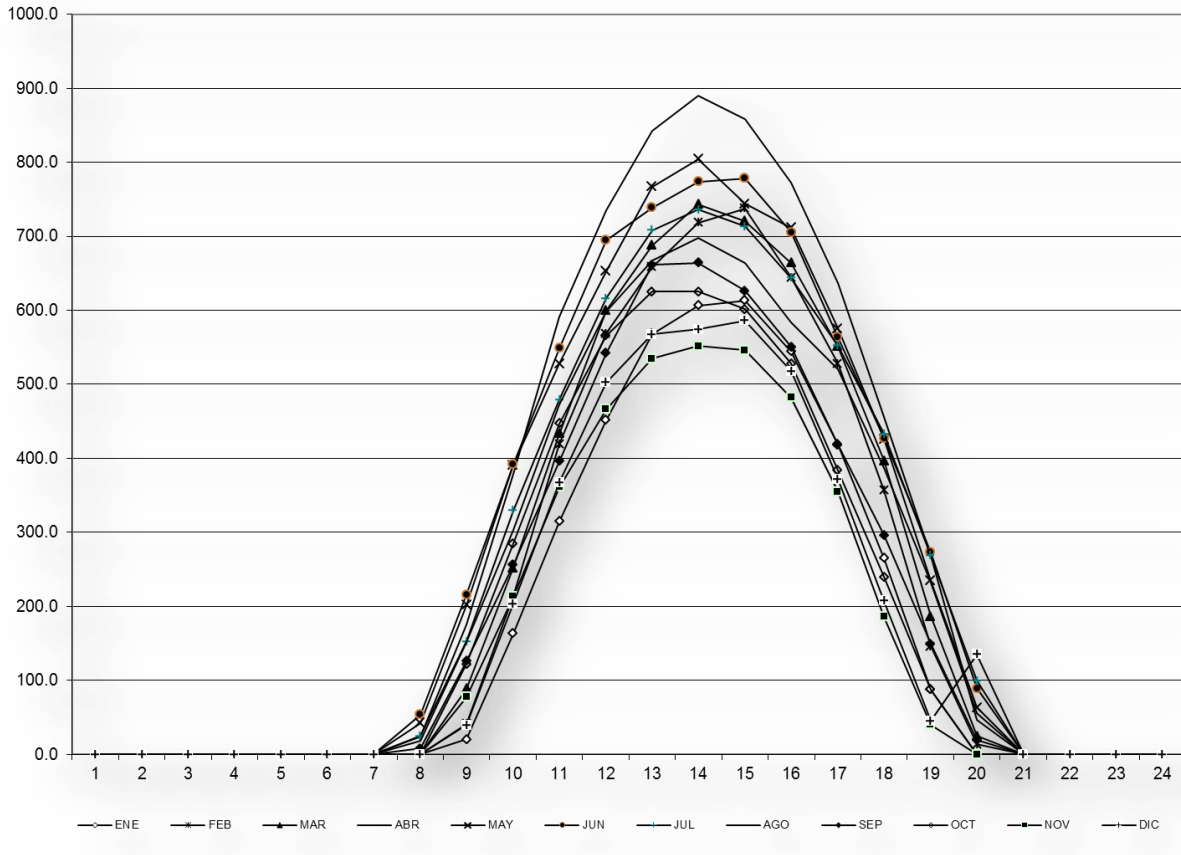


FIGURA 2.1.3.14. Radiación anual estimada para plano horizontal en el Valle del Mezquital

Como se ve en la figura 2.1.3.13. la mejor hora para obtener energía solar es de 13 a las 16 horas, siendo abril el mes con mayor cantidad de radiación disponible, prácticamente  $900\text{W/m}^2$  máxima, y un horario de disponibilidad energética promedio de siete de la mañana a las 21 horas para verano y de 8 de la mañana a 8 de la noche en invierno, y teniendo de las 12 a 5 una radiación por encima de los  $400\text{W/m}^2$ .

La radiación para plano inclinado se incrementa, alcanzándose prácticamente  $950\text{W/m}^2$ , teniendo arriba de  $500\text{W/m}^2$  a partir de las 11:00hrs y hasta a las 15hrs. La siguiente gráfica muestra la radiación anual para plano inclinado en el valle del mezquital (Figura 2.1.3.15):

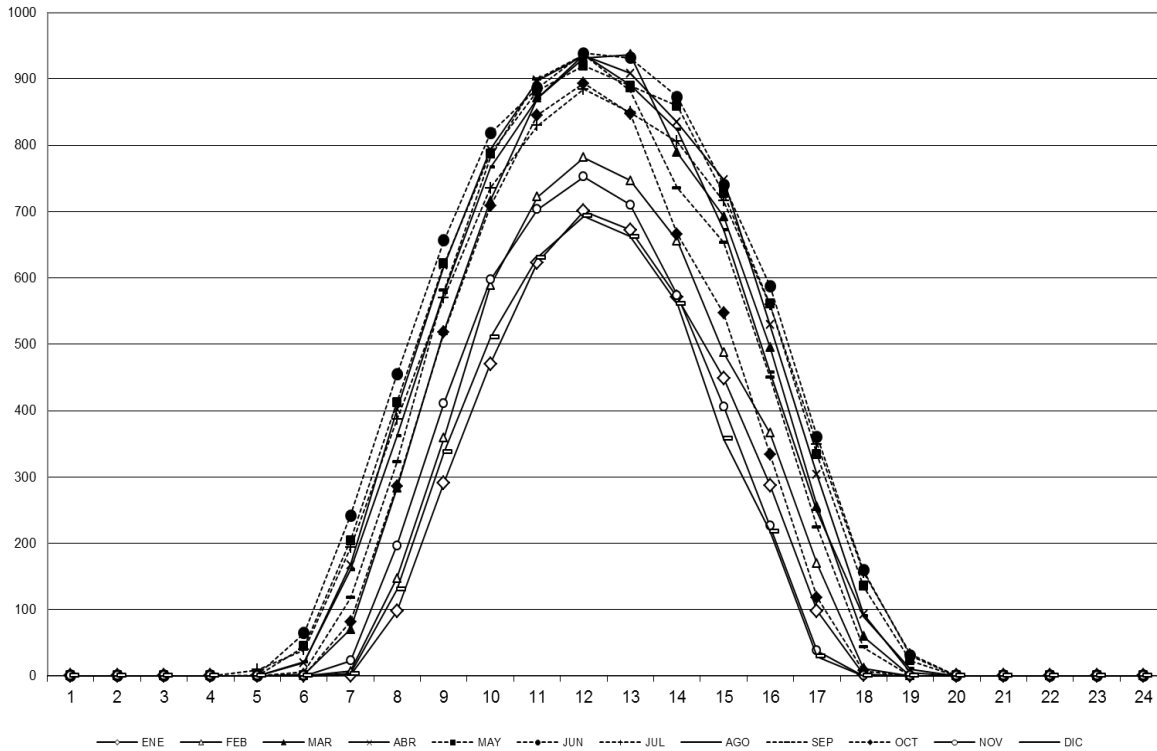


FIGURA 2.1.3.15. Radiación anual estimada para plano inclinado en el Valle del Mezquital

A partir de esta estimación energética y con la ayuda del colector, se puede obtener el calor útil para el suministro a los sistemas de calentamiento, ya sea para la obtención de agua caliente, para sistemas de enfriamiento o en nuestro caso, en los sistemas de secado de alimentos.

### 2.1.4 Inclinación óptima para captación de recurso solar en el Valle de la Muerte.

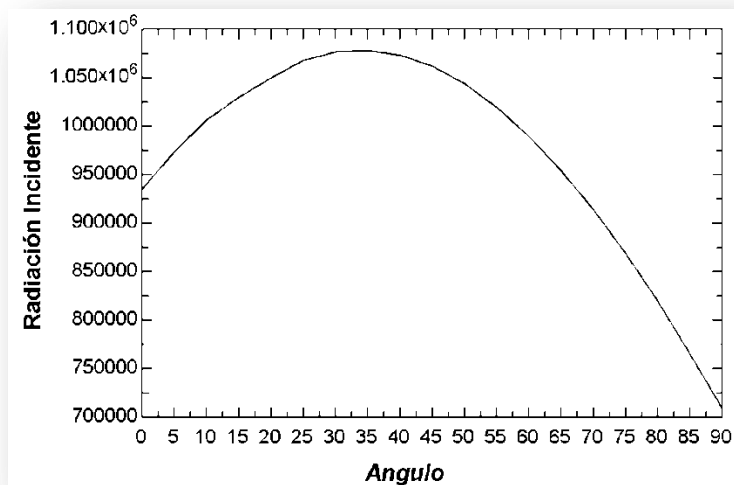
Para una mejor captación de energía, es necesario realizar una adecuada orientación del colector solar de acuerdo al movimiento aparente del sol, se busca que la mayor parte del tiempo el sistema de colección reciba los rayos solares en forma perpendicular. Cuando no se cuente con dispositivos de seguimiento solar, se deberá escoger una posición fija que permita al captador obtener el máximo posible de energía.

En nuestro caso, se busca el máximo de captación de energía con el mínimo de costos, se decide usar un colector de posición fija.

Al realizar los cálculos con la ayuda del METEONORM y TRNSYS encontramos que la inclinación adecuada de un sistema de captación depende del uso final del calor útil. Para un sistema de producción de energía fotovoltaica en el Valle de la Muerte, la adecuada inclinación para un sistema fijo se encuentra aproximadamente a  $20^\circ$  al sur (similar a la latitud del Valle del Mezquital), esto debido a que la demanda de energía tendrá que permanecer disponible durante todo el año.

En caso de requerir el calor útil para operación de un sistema de enfriamiento por absorción, la adecuada inclinación es de aproximadamente  $10^\circ$  ya que la demanda del sistema se da en el período de verano y los rayos solares inciden con una mayor altura solar requiriendo poca inclinación de los colectores.

Para un sistema fijo de calentamiento deberá ser de aproximadamente de  $32^\circ$  a  $34^\circ$ , esto debido a que la incidencia de los rayos solares, disminuyen en invierno y se requiere que la superficie captadora de energía útil este más vertical. En la Figura 2.1.4.1., se puede observar la disponibilidad de radiación incidente (kJ/h) según el ángulo de inclinación del colector para un sistema fijo de calentamiento.



#### 2.1.4.1. Radiación incidente en un colector en el valle de la muerte según su ángulo de inclinación.<sup>†</sup>

<sup>†</sup> La información fue calculada a partir de los datos obtenidos de Meteonorm y realizados los cálculos con ayuda del EES

## 2.1 Cálculos para colector plano

---

### 2.2.1 Tecnologías de captación solar térmica.

---

La función de las tecnologías de colectores solares térmicos es absorber o atrapar la radiación solar incidente sobre el colector y transferir dicha energía a un fluido que circula a través del mismo. El principio de funcionamiento del captador plano se basa en una “trampa de calor” que conjuga el “efecto de cuerpo negro” con el “efecto invernadero”.<sup>21</sup>

Los colectores solares (captadores, según la Real Academia de la Lengua Española), en los cuales la radiación electromagnética incide sobre una superficie sólida y, mediante el efecto foto térmico, se transforma en energía interna en el sólido, aumentando su temperatura. Una vez captada la radiación, se requiere transferir el calor generado hacia un fluido de trabajo que se encargará de llevar la energía hasta otro dispositivo en el cual se le dará el uso deseado. Sin embargo, el aumento en la temperatura del sólido origina, simultáneamente, que una parte de la energía captada se transfiera hacia el medio ambiente que rodea al colector por convección y radiación. Estos flujos de energía son pérdidas, pues disminuyen la cantidad de energía útil entregada por el colector a través del fluido de trabajo.

Existe una gran variedad de colectores solares y normalmente son clasificados por el nivel de temperatura del fluido caloportador que producen (baja, media o alta temperatura), o según el grado de concentración de la energía solar captada. Para los colectores térmicos suele definirse el grado de concentración solar (Ecuación 2.2.1.1), en base a las características geométricas:

$$C = \frac{A_c}{A_r} \quad (2.2.1.1)$$

Dónde:

C: Razón de concentración geométrica

$A_c$ : Área de captación solar del colector.

$A_r$ : Área de recepción o absorción del colector.

De acuerdo a lo anterior, se puede hacer una clasificación de los colectores solares térmicos en dos grandes grupos:

- ❖ Colectores solares planos ( $C = 1$ )
- ❖ Colectores solares de concentración ( $C > 1$ )

### **2.2.1.1. Colectores sin concentración.**

---

Dentro de la clasificación de los colectores solares planos se tienen los siguientes:

- Colectores de placa plana (con una o dos cubiertas).
- Colectores de placa plana con aislamiento térmico transparente (TIM).
- Colectores de tubos evacuados (gas de baja conductividad o aislamiento de vacío).
- Colectores con tubos de calor (con o sin vacío).

El colector solar plano es un intercambiador de calor que utiliza radiación solar para calentar un fluido de trabajo (fluido térmico), generalmente es agua, refrigerantes o aire.

Dicho colector tiene las siguientes características:

- Utiliza la radiación directa y difusa
- No es necesario un sistema de seguimiento del sol
- Requiere poco mantenimiento

El sistema de captación de placa plana (ver Figura 2.1.1.1), está compuesto por: 1) marco de aluminio anodizado; 2) cubierta de vidrio templado con alta transmitancia; 3) placa absorbedora, con aletas de cobre; 4) dispositivo de alimentación; 5) aislante térmico y 6) caja del colector, galvanizada.

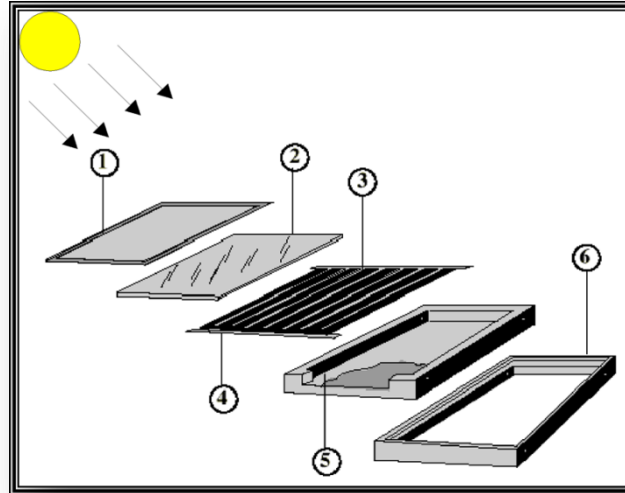


FIGURA 2.2.1.1. Elementos de un colector de placa plana

La principal función de la **cubierta** es reducir las pérdidas térmicas de la placa absorbente también reduce las pérdidas por radiación del colector ya que el vidrio es transparente a la radiación de onda corta recibida del sol, pero es casi opaco a la radiación de onda larga emitida por la placa absorbente. El vidrio es el material más utilizado como cubierta ya que puede transmitir hasta el 90% de la radiación solar de onda corta incidente y al mismo tiempo, es virtualmente opaco a la radiación de onda larga emitida por la placa absorbente.

El vidrio común usualmente tiene alto contenido de hierro y no se recomienda para aplicaciones de energía solar. Los materiales plásticos son una opción pero normalmente se limitan por el nivel de temperatura que pueden soportar sin deformarse o sin afectar sus propiedades ópticas. El uso de cubiertas antirreflexivas puede incrementar la eficiencia del sistema.

La placa absorbente tiene la función de absorber el máximo posible de la radiación solar que atravesó la cubierta y al mismo tiempo perder lo menos posible hacia la atmósfera y hacia la parte posterior del colector. Para maximizar el aprovechamiento de energía, la

placa trata con cubiertas selectivas que tienen alta absorbancia<sup>22</sup> para la radiación solar y baja emitancia<sup>23</sup> para la radiación de onda larga.

En la tabla 2.2.1. se tienen algunos valores típicos de emitancia y absorbancia para diferentes materiales del recubrimiento con los que se pueden construir los colectores de placa plana.

Recubrimiento	$\alpha$	$\epsilon$
CuO sobre cobre	0.89	0.17
Cromo negro sobre cobre	0.92	0.12
MnO <sub>2</sub> sobre acero inoxidable	0.85	0.20
NiS sobre níquel	0.91	0.11
CuO sobre níquel	0.81	0.17
Pintura negro mate	0.92	0.90

Tabla 2.2.1. Valores de admitancia y emitancia para algunos materiales

### 2.2.2. Análisis térmico.

En estado estable, el desempeño de un colector solar es descrito por un balance de energía que indica la distribución de la energía solar incidente en calor útil, pérdidas térmicas y pérdidas ópticas. La ecuación (2.2.2.1). Muestra la relación para obtener el calor útil que absorbe un colector, a partir del área del colector, de la energía incidente, de las pérdidas y las temperaturas de salida y de entrada de los fluidos caloportadores.

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_p - T_{amb})] \quad (2.2.2.1)$$

Dónde:

$Q_u$  = Calor útil,  $A_c$  = área de colección.

$S$  = energía que absorbe el absorbedor

$U_L$  = Coeficiente global de pérdidas de calor,

$T_p$  = temperatura de la placa absorbedora

$T_{amb}$  = Temperatura ambiente

22 LA ABSORBANCIA ES EL GRADO DE ABSORCIÓN DE LA LUZ O DE OTRA ENERGÍA RADIANTE A SU PASO A TRAVÉS DE UN MEDIO. WWW.DICCIONARIO.BABYLON.COM

23 LA EMITANCIA ES LA DENSIDAD DE FLUJO RADIANTE EMITIDO POR UNA SUPERFICIE. HTTP://RAMMB.CIRA.COLOSTATE.EDU/WMOVL/VRL/TUTORIALS/EUROMET/COURSES/SPANISH/NWP/N5710/N5710003.HTM

La radiación solar absorbida por un colector por unidad de área del absorbedor ( $S$ ), está definida por la ecuación (2.2.2.2.), es igual a la diferencia entre la radiación solar incidente y las pérdidas ópticas, en donde el primer sumando es la componente directa, la segunda es la componente difusa y el último sumando corresponde a la componente reflejada por el suelo.

$$S = I_b R_b (\tau\alpha)_b + I_d (\tau\alpha)_d \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \rho_g (I_b + I_d) (\tau\alpha)_g \left( \frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (2.2.2.2)$$

Así

$I_b$  = Radiación directa

$R_b$  = factor de inclinación de radiación directa

$(\tau\alpha)_b$  = producto de la transmitancia y absorbancia de la radiación directa

$I_d$  = radiación difusa

$(\tau\alpha)_d$  = producto de la transmitancia y absorbancia de la radiación difusa

$\beta$  = ángulo de inclinación de la superficie que capta la energía solar

$\rho_g$  = reflectancia del suelo

$(\tau\alpha)_g$  = producto de la transmitancia y absorbancia de la radiación reflejada

$\tau$  = transmitancia

$\alpha$  = absorbancia

Del total de energía que incide sobre el colector, el producto  $(\tau\alpha)$  es absorbido por la placa absorbidora y  $(1 - \alpha)\tau$  es reflejado de nuevo hacia la cubierta de vidrio.

La energía reflejada por la placa absorbidora se considera difusa por lo tanto, la fracción  $(1 - \alpha)\tau$  que incide sobre la cubierta es radiación difusa y  $(1 - \alpha)\tau\rho_d$  es reflejada de regreso a la placa absorbidora. Los efectos anteriormente descritos se pueden observar en la FIGURA 2.2.2.1.



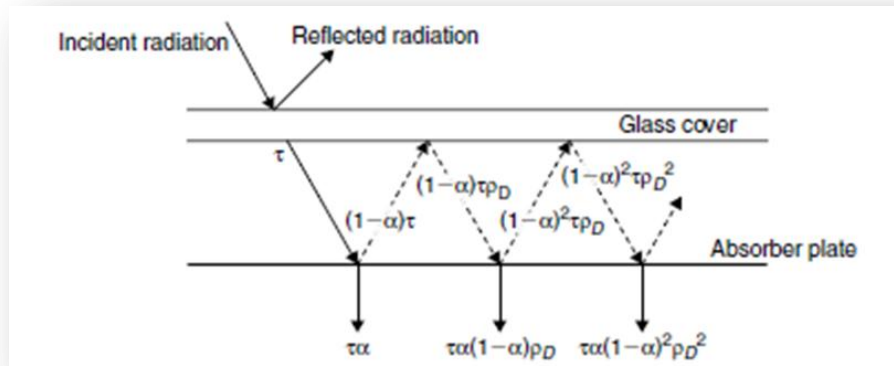


FIGURA 2.2.2.1 Radiación transferida entre la placa absorbente y en la cubierta de vidrio<sup>24</sup>

Se llevan a cabo múltiples reflexiones de radiación difusa de tal manera que la fracción de radiación solar absorbida por la placa absorbente se estima mediante (Ecuación 2.2.2.3):

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=1}^{\infty} [(1-\alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1-(1-\alpha)\rho_d} \quad (2.2.2.3)$$

Para aplicaciones prácticas de colectores solares, normalmente se utiliza la siguiente aproximación (Ecuación 2.2.2.3 y 2.2.2.4):

$$(\tau\alpha) \cong 1.01\tau\alpha \quad (2.2.2.3)$$

$$(\tau\alpha)_{B,D,g} = 1.01\tau \left( \frac{\alpha}{\alpha_n} \right) \alpha_n \quad (2.2.2.4)$$

En donde  $\alpha_n$  = absorbancia a incidencia normal ( $90^\circ$ ).

La reflectancia de la cubierta de vidrio para la radiación difusa incidente de la placa absorbente ( $\rho_d$ ), puede ser estimada por (Ecuación 2.2.2.5):

$$\rho = \frac{1}{2} \left[ \left( \rho_l + \frac{\tau\rho_2\tau_1}{\tau_2} \right)_{\perp} + \left( \rho_l + \frac{\rho_2\tau_1}{\tau_2} \right)_{\parallel} \right] = \frac{1}{2} (\rho_{\perp} + \rho_{\parallel}) \quad (2.2.2.5)$$

24. KALOGIROU, SOTERIS A 2009.

Para sistemas de una sola cubierta, normalmente se utilizan los valores de la TABLA 2.2.2.1 para  $\rho d$ . En esta tabla  $K$ = coeficiente de extinción del vidrio y  $L$ =espesor del vidrio.

Para $KL= 0.0125$	$\rho d =0.15$
Para $KL =0.0370$	$\rho d =0.12$
Para $KL =0.0524$	$\rho d =0.11$

TABLA 2.2.2.1 valores típicos de radiación difusa incidente de la placa absorbadora

Para un ángulo determinado de inclinación del colector, el ángulo efectivo de incidencia para la radiación difusa desde el cielo  $\theta_{e,D}$  y la radiación reflejada desde el suelo  $\theta_{e,g}$ , puede ser determinado por las siguientes correlaciones empíricas (Ecuación 2.2.2.6 y 2.2.2.7), en donde  $\beta$  es el ángulo de inclinación del colector.

$$\theta_{e,D} = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2: \quad (2.2.2.6)$$

$$\theta_{e,g} = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \quad (2.2.2.7)$$

La transmitancia de la cubierta de vidrio puede ser obtenida por la siguientes correlaciones (2.2.2.8, 2.2.2.9 y 2.2.2.10):

$$\tau \cong \tau_{\alpha} \tau_r \quad (2.2.2.8)$$

$$\tau_{\alpha} = e^{\left(-\frac{KL}{\cos\theta_2}\right)} \quad (2.2.2.9)$$

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left( \frac{1-r_{\parallel}}{1+r_{\parallel}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+r_{\perp}} \right) \quad (2.2.2.10)$$

Los componentes de la radiación paralela y perpendicular para superficies suaves se calculan de la siguiente forma (Ecuación 2.2.2.11 y 2.2.2.12):

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2.2.2.11)$$

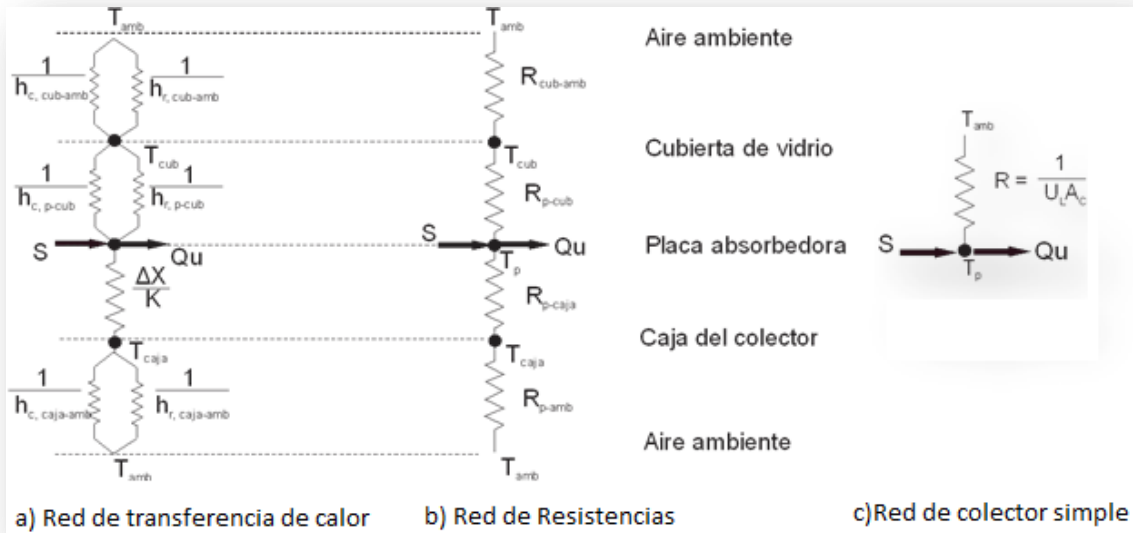
$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \tag{2.2.2.12}$$

Finalmente, la absorbancia dependiente del ángulo desde 0 a 80°, se obtiene de la siguiente correlación (Ecuación 2.2.2.13):

$$\frac{a}{a_n} = 1 + 2.0345 * 10^{-3}\theta_e - 1.99 * 10^{-4}\theta^2 + 5.324 * 10^{-6}\theta^3 - 4.799 * 10^{-8}\theta^4 \tag{2.2.2.13}$$

### 2.2.3 Estimación de pérdidas térmicas

Cuando incide radiación solar sobre la superficie de un colector, la mayor parte es absorbida y transferida al fluido como calor útil, el resto es transferido hacia el ambiente como pérdidas térmicas que pueden ser por conducción, convección y radiación. Estas pérdidas de calor se pueden representar como resistencias térmicas (Figura 2.2.3.1), más las pérdidas en el colector se pueden combinar en una simple resistencia R, como se muestra a continuación:



2.2.3.1 Red térmica de un colector con cubierta única en términos de (a) de la conducción, convección y radiación, (b) la resistencia entre las placas, y (c) una red de colectores simple.

Las pérdidas térmicas de un colector se pueden representar mediante la siguiente expresión (2.2.3.1):

$$Q_{perdidas} = U_L A_c (T_p - T_{amb}) \quad (4.3.1)$$

El coeficiente global de transferencia de calor es un parámetro que depende de las condiciones de operación y la construcción del colector y se puede escribir de la siguiente forma (2.2.3.2):

$$U_L = U_{arriba} + U_{abajo} + U_{lados} \quad (2.2.3.2)$$

### 2.2.3.1 Flujo de calor de placa hacia la cubierta de vidrio

El flujo de calor desde la placa hacia la cubierta de vidrio se define por (2.2.3.3) (Kalogirou Soteris A. 2009):

$$Q_{p-cub} = A_c h_{c,p-cub} (T_p - T_{cub}) + \frac{A_c \sigma (T_p^4 - T_{cub}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{cub}} - 1} \quad (2.2.3.3)$$

Donde la primera parte de la suma representa el flujo por convección y la segunda el flujo por radiación. Los elementos de la ecuación corresponden a:

- $Q$  = flujo de calor
- $p$  = placa absorbidora
- $cub$  = cubierta
- $A_c$  = área de colección
- $h_c$  = coeficiente de transferencia de calor por convección
- $\varepsilon$  = emisividad
- $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzman

Para ángulos de inclinación de hasta 60 °, el coeficiente de transferencia de calor por convección está dado por la ecuación de Hollands et al. (1976) (ecuación 2.2.3.4), donde  $\Theta$  es la inclinación del colector en grados:

$$Nu = \frac{h_{c,p-cub} L}{k}$$

$$Nu = 1 + 1.446 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right] \left\{ 1 - \frac{1708[\sin 1.80]^{1.6}}{Ra \cos \theta} \right\} + \left\{ \left[ \frac{Ra \cos \theta}{5830} \right]^{0.333} - 1 \right\} \quad (2.2.3.4)$$

Dónde:

Nu =	Numero de Nuselt
L =	distancia entre la placa absorbedor y la cubierta de vidrio
k =	conductividad térmica del aire
Ra =	Numero de Rayleigh
$\theta$ =	ángulo de inclinación del colector

A su vez el número de Rayleigh está definido por Ecuación (2.2.3.5):<sup>†</sup>

$$Ra = \frac{g\beta'Pr}{\nu^2} (T_p - T_{cub})L^3 \quad (2.2.3.5)$$

Dónde:

$g$ =	constante gravitacional (9.81m/s <sup>2</sup> )
$\beta'$ =	coeficiente de expansión volumétrica
Pr=	número de Prandtl
$\nu$ =	viscosidad cinemática

Y el número de Prandtl (Pr)(2.2.3.6) se define como:

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha} = \frac{\text{Velocidad de difusión del momento}}{\text{velocidad de difusión del calor}} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (2.2.3.6)$$

dónde:

- $\nu$  es la viscosidad cinemática.
- $\alpha$  es la difusividad térmica.
- $C_p$  es la capacidad calorífica a presión constante.
- $\mu$  es la viscosidad.
- $k$  es la conductividad térmica.

<sup>†</sup> Nota: las propiedades del fluido deben ser evaluadas a la temperatura promedio entre la placa y la cubierta de vidrio

El flujo de calor desde la placa hacia la cubierta de vidrio está definido por:

$$Q_{p-cub} = A_c h_{c,p-cub} (T_p - T_{cub}) + \frac{A_c \sigma (T_p^4 - T_{cub}^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{cub}} - 1} \quad (2.2.3.7)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la placa absorbadora y la cubierta de vidrio está definido por (2.2.3.8) y el calor de la placa a la cubierta por (2.2.3.9):

$$h_{r,p-cub} = \frac{\sigma (T_p - T_{cub}) (T_p^2 + T_{cub}^2)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{cub}} - 1} \quad (2.2.3.8)$$

$$Q_{p-cub} = A_c (h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub}) (T_p - T_{cub}) = \frac{T_p - T_{cub}}{R_{p-cub}} \quad (2.2.3.9)$$

$$R_{p-cub} = \frac{1}{A_c (h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub})} \quad (2.2.3.10)$$

### 2.2.3.2 Flujo de calor desde la cubierta de vidrio hacia el ambiente

El flujo de calor de la cubierta de vidrio del colector hacia el ambiente está definido por (2.2.3.11) y su coeficiente de transferencia es (2.2.3.12):

$$Q_{cub-amb} = A_c (h_{c,cub-amb} + h_{r,cub-amb}) (T_{cub} - T_{amb}) = \frac{T_{cub} - T_{amb}}{R_{cub-amb}} \quad (2.2.3.11)$$

$$h_{c,cub-amb} = \frac{8.6V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (2.2.3.12)$$

*Dónde:*

$V$  = velocidad del viento

$L$  = longitud del colector

Para resolver la ecuación (2.2.3.11) se necesita la resistencia térmica de la cubierta-ambiente (ecuación 2.2.3.14), así como el coeficiente de transferencia entre cubierta y ambiente entonces

$$h_{r,cub-amb} = \varepsilon_{cub} \sigma (T_{cub} - T_{amb})(T_{cub}^2 + T_{amb}^2) \quad (2.2.3.13)$$

$$R_{cub-amb} = \frac{1}{A_c(h_{c,cub-amb} + h_{r,cub-amb})} \quad (2.2.3.14)$$

Dado que las resistencias de la placa absorbidora a la cubierta (ecuación 2.2.3.10) y de la cubierta al ambiente (ecuación 2.2.3.14) están en serie (ecuación (2.2.3.15), entonces tenemos que el calor que se pierde está definido por la ecuación (2.2.3.16)

$$R_{arriba} = R_{p-cub} + R_{cub-amb} = \frac{1}{U_{arriba} A_c} \quad (2.2.3.15)$$

$$Q_{arriba} = \frac{T_p - T_{amb}}{R_{arriba}} = U_{arriba} A_c (T_p - T_{amb}) \quad (2.2.3.16)$$

El coeficiente global de pérdidas de calor por la parte superior está definido por (2.2.3.17):

$$U_{arriba} = \frac{1}{\frac{1}{(h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub})} + \frac{1}{(h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub})}} \quad (2.2.3.17)$$

### 2.2.3.3 Flujo de calor desde la parte posterior de la caja hacia el ambiente

Las pérdidas de energía desde la caja (parte posterior) hacia el ambiente incluyen un proceso de conducción a través del aislamiento y posteriormente una mezcla de convección y radiación transmitida hacia el aire de los alrededores. Dado que la temperatura de la parte posterior de la caja es relativamente baja, el término de radiación se puede despreciar, por lo que la pérdida de energía se define como (2.2.3.18):

$$U_{caja} = \frac{1}{\frac{X_b}{K_b} + \frac{1}{h_{c,caja-amb}}} \quad (2.2.3.18)$$

Dónde:

$X_b$ = Espesor de la capa aislante

$K_b$ = Conductividad del aislante.

#### 2.2.3.4 Flujo de calor desde los lados de la caja hacia el ambiente

Al igual que las pérdidas de energía desde la parte posterior de la caja hacia el ambiente, el flujo del calor desde los lados de la caja hacia el ambiente, incluye un proceso de conducción a través del aislamiento, convección y radiación transmitida a los alrededores. entonces (2.2.3.19):

$$U_{lados} = \frac{1}{\frac{X_{lados}}{K_{lados}} + \frac{1}{h_{c,lados-amb}}} \quad (2.2.3.19)$$

Dónde:

$X_{lados}$ = Espesor del aislamiento en los lados

$K_{lados}$ = Conductividad térmica del aislamiento en los lados.

#### 2.2.3.5 Coeficiente global de pérdidas de calor

El coeficiente global de transferencia de calor, involucra todos los coeficientes individuales considerando su arreglo (serie o paralelo) y en el caso de un colector de placa plana se define con la ecuación (2.2.3.2), sustituyendo los coeficientes individuales nos queda de la forma (2.2.3.20):

$$U_L = \frac{1}{\frac{1}{(h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub})} + \frac{1}{(h_{c,p-cub} + h_{r,p-cub})}} + \frac{1}{\frac{X_b}{K_b} + \frac{1}{h_{c,caja-amb}}} + \frac{1}{\frac{X_{lados}}{K_{lados}} + \frac{1}{h_{c,lados-amb}}} \quad (2.2.3.20)$$



### 2.2.3.6. Eficiencia del colector.

La eficiencia instantánea del colector está definida por la ecuación (2.2.3.21)<sup>25</sup> la cual es:

$$\eta = \frac{\text{calor útil}}{\text{Radiación incidente en el colector}} = \frac{Q_u}{A_p I_T} \quad (2.2.3.21)$$

En esta definición, el área de la placa absorbadora ( $A_p$ ) es utilizada en el denominador, a menudo el área de apertura del colector también se puede escribir como  $A_a$ , o  $A_c$ . El área de apertura del colector es la apertura en la cubierta superior a través de la cual, la radiación solar es absorbida por el colector, mientras que el área bruta del colector es la superficie de la cubierta superior (incluyendo el marco). Como suele ser de unos 10 a 15 por ciento más de  $A_p$ , mientras que el  $A_c$  es de 15 a 20 por ciento más que  $A_p$ .

Se puede calcular la eficiencia a partir del flujo másico ( $\dot{m}$ ), del calor específico del fluido caloportador ( $c_p$ ), de la temperatura de entrada ( $T_i$ ) y de salida del fluido ( $T_o$ ), así como de la irradiancia solar global. A partir de la ecuación 2.2.3.22.

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_o - T_i)}{A_a G_t} \quad (2.2.3.22)$$

### 2.2.4 Cálculos para colector plano, un caso especial en el valle del Mezquital.

Como ya se ha comentado anteriormente, la energía que absorbe el colector dependerá de su inclinación, según el día del año; así mismo el calor útil depende de una serie de factores, en especial del área del colector, de la energía que absorbe el absorbedor, del Coeficiente global de pérdidas de calor y las temperaturas de entrada y salida del fluido caloportador.

Fundamentado en lo anterior y a partir de un modelo físico de colector plano de fabricación artesanal propia, se toman las consideraciones siguientes:

Área de colector:	0.2 m <sup>2</sup>
Fluido caloportador:	Aire
Temperatura ambiente:	30°C
Coeficiente de expansión volumétrica:	1/333
Distancia entre la placa absorbedora y la cubierta de vidrio	0.2m
Angulo de inclinación del colector	20°
Emisividad placa	0.95
Emisividad Cubierta:	0.09
Velocidad del viento:	1.5m/s
Longitud del colector:	0.4m
Radiación Directa	665W/m <sup>2</sup>
Radiación Difusa	230W/m <sup>2</sup>
Reflectancia del suelo:	0.2
Factor de inclinación	0.938
Coeficiente del vidrio	0.037
Absorbancia de la placa	0.91
Índice de refracción del vidrio	1.526
Grosor de vidrio	0.003m
Espesor de la capa aislante	0.012m

El colector es un prisma de base rectangular construida de lámina común tipo pintro de calibre 18, pintada de negro mate, con un aislante de unicel de ½ inch, un área de colector de 0.2m<sup>2</sup>, cubierta con un vidrio de 0.003m.separada de la placa absorbedora a 0.02m y la cual se podía ajustar a 0.40m.

Las consideraciones anteriores son obtenidas directamente del modelo físico<sup>26</sup> o en su caso, de tablas como la 2.2.1 ó 2.2.2.1 o bien de valores típicos, para el caso del índice de refracción del vidrio.

Al tomar como referencia de la ecuación 2.2.2.1 a la 2.2.3.21, se realizó un programa con la ayuda del EES (Engineering Equation Solver); introduciendo los datos anteriores en dicho programa, se pueden obtener las características del colector, obteniendo los siguientes resultados:

Coefficiente global de pérdidas de calor de 5.4 unidades, Calor útil de  $117.9\text{w/m}^2$  y una eficiencia del colector de 60.93%, con lo que podemos considerar un colector de características aceptables a partir del parámetro de la eficiencia.

26 Las medidas del modelo físico fueron tomadas para mayor facilidad de traslado del colector y buscando materiales económicos para su construcción

---

# CAPÍTULO III

---

## MODELADO, PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

---

Este capítulo contiene un análisis de los datos obtenidos a partir de la simulación de nuestro colector, así como el modelado para obtener el estado mecánico del sistema. Al finalizar contiene los datos medidos en campo de nuestro colector, el calor útil que se puede aprovechar del mismo y las ecuaciones que rigen su comportamiento.

### 3.1 Calor teórico útil en el colector.

Con un colector de placa plana de  $0.2\text{m}^2$  de área de captación y con los datos del tópico 2.2.4; y a partir de la radiación diaria obtenida utilizando el METEONORM para el Valle de la Muerte, sacando estos datos con la ayuda de TRANSYS (Véase imagen 3.1.1) y evaluando esta información en el programa realizado para obtención del calor útil en el EES se obtiene la gráfica 3.1.2 del calor útil estimado en nuestro colector.<sup>27</sup>

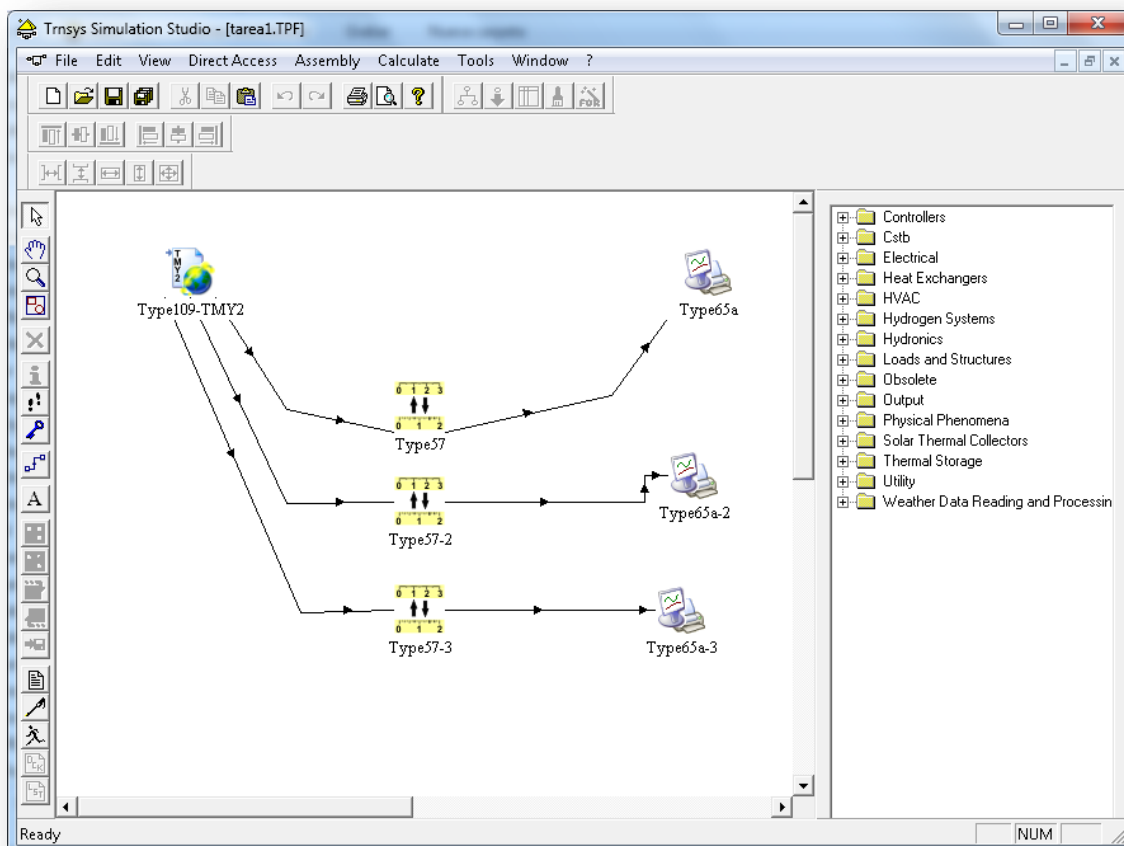


Figura 3.1 1 Obtención de radiación utilizando TRANSYS y METEONORM

27 Los datos fueron calculados a partir de la. Radiación anual para plano inclinado en el Valle del Mezquital (Ixmiquilpan). Para más detalles ver Anexo II.

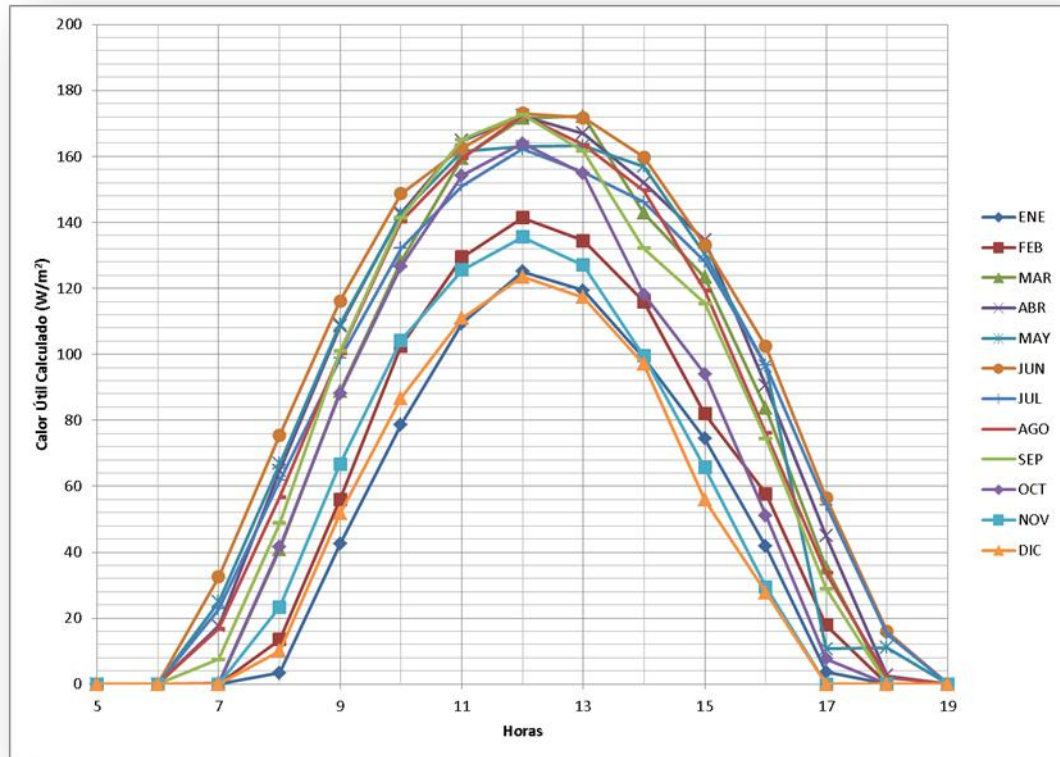


Figura 3.1.2 Calor teórico útil en el colector

En la figura 3.1.2. se observa un calor útil por encima de los  $100\text{w/m}^2$  durante más de 3 horas al día, alcanzando un máximos cercanos a los  $180\text{W/m}^2$  durante 8 meses del año. Es importante hacer notar que es un colector de apenas  $0.2\text{ m}^2$ , incrementando de manera significativa el valor del calor útil al incrementar el área de la placa absorbadora del colector

### 3.2 Radiación medida en el colector.

Se procedió a medir la radiación solar (Fig 3.2.1) utilizando el MacSolar V4 (Véase Figura 3.2.2), de la empresa SOLARC, Innovative Solarprodukte GmbH, el cual está certificado de acuerdo a las normas CE/EN50081, EN50082 y EN50068 y calibrado de acuerdo a la norma IEC904/3, obteniendo los resultados de la Figura 3.2.3.



Figura 3.2.1. Medición de la radiación solar en campo.



Figura 3.2.2. Medidor de Radiación Solar MacSolar V4

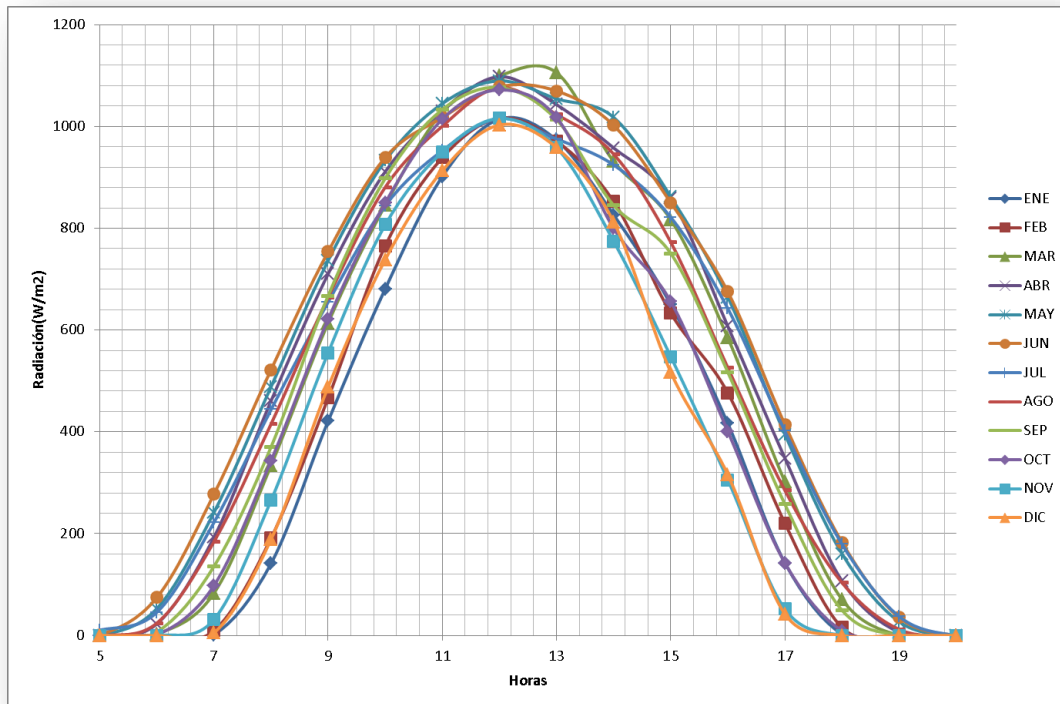


FIGURA 3.2.3. Radiación anual medida para plano inclinado en el Valle del Mezquital (Ixmiquilpan)

Al observar la FIGURA 2.2.3.15 con respecto a la FIGURA 3.2.3 se encuentra una radiación entre 15% y 44% mayor de la radiación medida a la radiación estimada, debido a que no se tienen registros de la radiación solar en el lugar de trabajo, esta puede variar de un año a otro, por ahora se continúan las mediciones y solo pueden ser comparadas con las estimadas, es importante hacer notar que solo es la radiación de un año, y hay variaciones climáticas entre año y año.

### **3.3 Modelado para determinar las condiciones de transporte.**

Paso 1. Se escriben las Ecuaciones de Hamilton y se resuelve para  $p$  y  $q$ .

Paso 2. Se encuentra  $W^*$  y por lo tanto, el  $W$  generador de una transformación a las constantes canónicas

Paso 3. pudiendo escribir las Ecuaciones de transformación que son solución para  $p$  y  $q$



Paso 4. Para corroborar, se muestra que la función de Hamilton nuevo es igual a cero, por lo tanto se comprueba que los nuevos parámetros son constantes.

Paso 5. Se comparan las soluciones obtenidas en los pasos 1 y 3.

Paso 6. Se verifica que la transformación en el paso 3 es una transformación canónica.

A partir de la serie de pasos anteriores:

Para obtener la Hamiltoniana, se parte de la Lagrangiana del sistema, entonces

$$L=T-V$$

recordemos que T representa la energía cinética y V la energía potencial.

$$L = T - V = \frac{1}{2}m\dot{q}^2 - mgh; \quad (3.3.1)$$

Se sabe que

$$P = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = m\dot{q} \Rightarrow \dot{q} = p/m \quad (3.3.2)$$

Entonces, de la ecuación (1.2.8.5.1):

$$H = \sum_{\alpha=1}^n p_{\alpha}\dot{q}_{\alpha} - L = p * \dot{q} - \left(\frac{1}{2}m\dot{q}^2 - mgh\right) \quad (3.3.3)$$

Si el sistema mecánico es conservativo, y recordando que el momento se puede definir a partir de la mínima acción (ecuación 1.2.8.6.4) y sustituyéndola en la ecuación (3.3.3):

$$H = p\dot{q} - \left(\frac{p^2}{2m} - mhg\right) \quad (3.3.4)$$

Sustituyendo la ecuación (1.2.8.3.1) también llamada a veces acción integral en la ecuación (3.3.4)

$$\frac{\partial \mathcal{S}}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left( \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial q} \right)^2 + mgh = 0 \quad (3.3.5)$$

de

$$\mathcal{S} = S_1(q) + S_2(t) \quad (3.3.6)$$

Se deduce

$$\frac{1}{2m} \left( \frac{\partial S_1}{\partial q} \right)^2 + mgh = - \frac{dS_2}{dt} \quad (3.3.7)$$

estableciendo una constante  $\beta$  en cada lado de la igualdad

$$\frac{1}{2m} \left( \frac{\partial S_1}{\partial q} \right)^2 + mgh = \beta \quad \text{y} \quad \frac{dS_2}{dt} = -\beta \quad (3.3.7)$$

cuya solución ,omitiendo las constantes de integración, separando las variables e integrando es

$$\int ds_1 = \int \sqrt{2m\beta - 2m^2gh} dq \quad \text{y} \quad \int ds_2 = \int -\beta dt \quad (3.3.8)$$

$$S_1 = \int \sqrt{2m\beta - 2m^2gh} dq \quad \text{y} \quad S_2 = -\beta t \quad (3.3.9)$$

de la ecuación (3.3.6)

$$\mathcal{S} = \int \sqrt{2m\beta - 2m^2gh} dq - \beta t \quad (3.3.10)$$

Identificamos  $\beta$  como el nuevo las nuevas coordenadas del momento P. Entonces la posición de las nuevas coordenadas son,

$$Q = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \int \sqrt{2m\beta - 2m^2gh} dq - \beta t \right\} \quad (3.3.11)$$

$$= \frac{\partial}{\partial \beta} \left\{ \sqrt{2m} \int \sqrt{\beta - mgh} dq - \beta t \right\} \quad (3.3.12)$$

$$= \frac{\sqrt{2m}}{2} \int \frac{dq}{\sqrt{\beta - mgh}} - t \quad (3.3.13)$$

pero dado que las nuevas coordenadas  $Q$  son una constante  $\gamma$ ,

$$\frac{\sqrt{2m}}{2} \int \frac{dq}{\sqrt{\beta - mgh}} - t = \gamma \quad (3.3.14)$$

Integrando y resolviendo para  $q$

$$q = (\gamma + t) \left( \frac{\sqrt{2\beta - 2mgh}}{\sqrt{m}} \right) \quad (3.3.14)$$

Que es la solución requerida. Las constantes  $\beta$  y  $\gamma$  se pueden encontrar a partir de las condiciones iniciales.

### 3.4 Medición del calor útil en el colector.

Tomando nuestro sistema bajo el régimen de convección natural, se sabe que para un sistema que conduce calor de esta forma, el modelo apropiado para la conducción está dado por la ecuación (1.2.8.1.1) es decir:

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

Como no se cuenta con equipo para medir el calor útil, pero si con equipos para medir temperaturas y características ambientales, se obtuvo el coeficiente de convección mediante cálculos. Las temperaturas de entrada y salida del fluido fueron medidas con el equipo TMA40-A Datalogging Anemometer (FIGURA 3.4.1), además de utilizar la Fluid Properties Calculator<sup>28</sup> para la obtención de las características del fluido, dentro de los cuales a partir de las temperaturas nos entrega resultados de densidad, viscosidad cinemática y dinámica, el número de Prandtl, el calor específico, conductividad, incluso el coeficiente de expansión volumétrica.



FIGURA 3.4.1. Medición de temperaturas del fluido de trabajo (Aire)

Con el uso de la ley de enfriamiento de Newton para el *coeficiente local de convección*  $h$ , el número de Nusselt local se puede expresar como

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} \quad (3.4.1)$$

de donde se puede obtener el coeficiente de convección en la ecuación de calor utilizando  $L$  y  $k$  (conductividad).

A su vez para calcular el número de Nusselt se utiliza la correlación debida a Churchill y Chu para fluidos laminares en una placa vertical.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \quad Ra_L \leq 10^9 \quad (3.4.2)$$

Se tomaron medidas en nuestro colector en una posición horizontal, para poder hacer el análisis de la convección libre y obtener nuestras primeras mediciones.

A su vez, para obtener el número de Nusselt, tenemos que obtener el número de Rayleigh, que se obtiene a partir de

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad (3.4.3)$$

Donde  $\beta$  es la propiedad termodinámica del fluido llamada coeficiente volumétrico de expansión térmica (vea ecuación (1.2.8.1.5)),  $g$  la aceleración de la gravedad,  $L$  la longitud del colector,  $\nu$  viscosidad cinemática y  $\alpha$  difusividad térmica.

Ahora sí, conociendo los datos del número de Rayleigh, y con la ayuda de Fluid Properties Calculator, se obtiene el número de Nusselt y de ahí el coeficiente de convección para terminar obteniendo los calores útiles en nuestro colector, a partir de los datos obtenidos se tiene el calor útil de la Figura 3.4.2.

Donde se puede observar que el calor útil arriba de  $100 \text{ W/m}^2$  al menos 4 horas diarias.

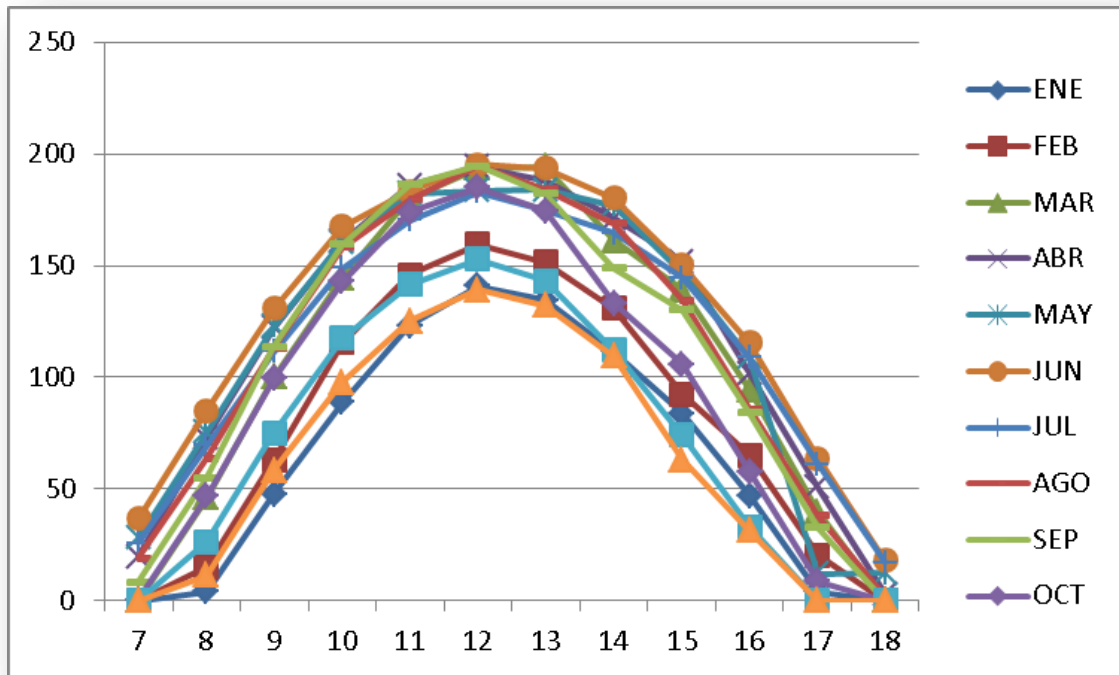


FIGURA 3.4.2. Calores útiles medidos en el colector.

### 3.5. Balance energético.

Partiendo del primer principio de la termodinámica<sup>29</sup>, se tiene

$$Q - W = T + V + U \quad (3.5.1)$$

Donde Q es calor, W es el trabajo, T energía cinética, V energía potencial y U energía interna.

Para nuestro colector, considerando que  $\frac{dT}{dt} \sim 0$ , entonces  $W \approx 0$ , sustituyendo la ecuación (1.2.8.1.1.) y (3.3.3) en (3.5.1), reordenando se tiene

$$hA(T_s - T_\infty) = \left( \sum_{\alpha=1}^n p_\alpha \dot{q}_\alpha - L \right) + U \quad (3.5.2)$$

Como  $H=T+V$ , entonces

$$U = hA(T_s - T_\infty) - \left( \sum_{\alpha=1}^n p_\alpha \dot{q}_\alpha - L \right) \quad (3.5.3)$$

$$U = hA(T_s - T_\infty) - \left( p\dot{q} - \left( \frac{p^2}{2m} - mhg \right) \right) \quad (3.5.4)$$

Si se consideran las mediciones de  $\dot{q}$  obtenidas por *Ref : Dilip R. Pangavhane, R.L. Sawhney, P.N. Sarsavadia*. Se encuentra lo siguiente:

$$U = 0.9955Q \quad (3.5.5)$$

$$H = 0.0045Q \quad (3.5.6)$$

a su vez

$$T = 16.9x10^{-6}H \quad (3.5.7)$$

o bien

$$T = 76.7x10^{-9}Q \quad (3.5.7)$$

Ahora como el estado mecánico futuro del sistema, está definido por la ecuación (3.3.15), si se toman las medidas realizadas en el colector, y las condiciones iniciales como  $\beta=H$  y  $\gamma=.01$  se tiene

$$\begin{aligned} q &= (\gamma + t) \left( \frac{\sqrt{2\beta - 2mgh}}{\sqrt{m}} \right) \\ &= (0.01 + 1) \left( \frac{\sqrt{2 * 0.0045Q - 2 * 0.3 * 9.81 * 0.3}}{\sqrt{0.3}} \right) \end{aligned} \quad (3.5.8)$$

Donde  $q$  que es la posición del estado futuro siguiente, toma un valor de 0.026m, que sería la posición de un diferencial de masa definido, en  $t+1$  segundos para el caso de las condiciones de frontera propuestas.

Finalmente se puede obtener el valor de  $\dot{q}$  derivando la ecuación (3.3.14), obteniendo así, la velocidad en nuestro sistema; y como con la velocidad y la masa se obtiene el momento, consecuentemente resulta el estado mecánico del sistema.

Ahora bien, de las ecuaciones (1.2.8.4.3) y (1.2.8.5.3)

$$L + H = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.5.9)$$

y

$$L + H = mv^2 \quad (3.5.10)$$

y como

$$L + H = pv = p \frac{dq}{dt} \quad (3.5.11)$$

Por lo que

$$\frac{p}{dt} = \frac{L + H}{dq} \quad (3.5.12)$$

que será la ecuación de conservación de momento para nuestro sistema.

Ahora, considerando la condición de conservación de momento a partir de la primera ley de Newton

$$\frac{dp}{dt} = 0 \quad (3.5.13)$$

y debido al proceso de convección natural



$$\nabla.p = cte \quad (3.5.14)$$

y de (2.8.3.3)

$$mv_e = \frac{2T}{v_s^2} * \frac{\sqrt{2T}}{\sqrt{m}} \quad (3.5.15)$$

entonces

$$mv_e = \frac{\sqrt{(2T)^3}}{\sqrt{mv_s^2}} = \sqrt{\frac{8T^3}{mv_s^4}} \quad (3.5.16)$$

$$mv_e = \sqrt{\frac{8T^3}{mv_s^4}} \quad (3.5.17)$$

que será la condición de continuidad para nuestro sistema.

Finalmente con la ecuación 3.5.17 se determinan el conjunto de condiciones necesarias y suficientes para el tratamiento de nuestro caso de estudio.

---

## Conclusiones

---

A lo largo de la historia el hombre ha utilizado el sol como fuente de energía, para el caso del Valle del Mezquital no ha sido la excepción, hoy en día se usa para deshidratar alfalfa para consumo de animales, o para deshidratar productos para consumo humano, como el chile y algunas frutas.

Desgraciadamente la deshidratación de alimentos es poco utilizada para el consumo humano, sabiendo que, si el proceso es correcto, se conservan la mayoría de las propiedades de los alimentos, alargando el tiempo de consumo y las ganancias por la venta de alimentos deshidratados. Ixmiquilpan cuenta con 340 días al año con un clima soleado, lugar propicio para la deshidratación y la utilización de la energía solar, por lo que se midió la radiación solar en el Valle de la Muerte durante un año natural.

Una vez terminadas las mediciones encontramos que tenemos una radiación solar por encima de los  $600 \text{ W/m}^2$  cinco horas al día prácticamente durante todo el año y, radiaciones que rebasan los  $1000 \text{ W/m}^2$  en un par de horas durante seis meses al año. También encontramos que al medio día solar, se alcanzan los  $1000 \text{ W/m}^2$  de radiación directa, por lo menos durante una hora diaria.

En el colector se midió que a través del cristal usado para generar el efecto invernadero, se pierde entre 8 y 9% de la radiación incidida, y que podemos alcanzar a aprovechar arriba de  $100 \text{ W/m}^2$  durante aproximadamente 5 horas al día. Tomando en cuenta las dimensiones del colector, esta cantidad de radiación puede incrementarse considerablemente, si aumentamos el área del colector.

Es importante hacer notar que la Inclinación del colector es clave para poder absorber el máximo de la radiación incidente, por lo que para nuestro caso, la inclinación recomendada es de 33 y 34° LN calculado con ayuda de METEONORM, de TRNSYS y de EES.

Del último capítulo, se puede observar que la mayoría de la energía solar absorbida por el colector es utilizada para el calentamiento del fluido, mientras que una pequeñísima

fracción hace que el aire suba generando el efecto convectivo. Como se puede observar en la ecuación 3.5.5, el 99 por ciento de la energía absorbida se convierte en energía interna, es decir en calor.

A su vez, de la ecuación de Hamilton-Jacobi y de la 1ª ley de la termodinámica encontramos que el Hamiltoniano es el 0.45% de la energía de sistema, condición necesaria y suficiente para conseguir la convección natural, que si bien, la velocidad con la que se desplaza el aire pareciera ser pequeña, es capaz de provocar flujo másico suficiente para conseguir la deshidratación, situación que es posible mejorar utilizando el viento que fluye en el entorno del colector; sin embargo dicho estudio sale de los objetivos del presente trabajo, por lo que se recomienda que en el futuro se realicen trabajos en esta área de oportunidad.

## Referencias

---

1. **Biomass Users Network (bun-ca)** 2002. Manuales sobre Energía Renovable: Solar Térmica/biomass. 1ª ed. ISBN: 9968-904-01-5. San José, C.R. pp. 3-26
2. **Centro Uruguayo de Tecnologías Apropriadas.** 2007. Colectores Solares, Autoconstrucción de cocinas y calentadores de agua. Montevideo Uruguay..Pág WEB [www.tecnologiasapropiadas.com/biblioteca/CeutaEnergiaSolarParte3.pdf](http://www.tecnologiasapropiadas.com/biblioteca/CeutaEnergiaSolarParte3.pdf)
3. **CTE- Centro de Tecnología Educativa.** 1995. Curso de energía solar, dossier de trabajo. ISBN Dossier de trabajo:84-7608-053-0. Barcelona España.
4. **Dilip R. Pangavhane, R.L. Sawhney, P.N. Sarsavadia.** 2002 Design, development and performance testing of a new natural convection solar dryer. Energy 27(2020) 579-590. Elsevier Science Ltd. All rights reserved. India. . Pp. 578-590  
[www.elsevier.com/locate/energy](http://www.elsevier.com/locate/energy)
5. **Donald Q. Kern,** 1999. Procesos De Transferencia De Calor, Compañía Editorial Continental, S.A. De C.V. ISBN: 968-26-1040-0. México. Pp 13-43, 243-260
6. **Duffie, J.A. y Beckman, W.A.** 1991. “Solar Engineering of Thermal Processes”. Ed. John Wiley & Sons, (2ª Edición), ISBN: 0-471-22371-9. New York, EEUU. Pp 12-134, 238-310
7. **E. H. Holt, R. E. Maskell.** 1968. Foundation of plasma Dynamics. The Mac Millan Company. Library of Congress Catalog Card Number: 65-14072. USA. Pp. 156-166
8. **Eduardo A.Rincón Mejía** 1999 Estado del arte de la investigación en energía solar en Mexico. Cuadernos FICA México. Pp 2-25.
9. **Enciclopedia de los Municipios de México, Hidalgo.** 2005. Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Hidalgo.© H. Ayuntamiento de Ixmiquilpan. Pág WEB [www.e-local.gob.mx](http://www.e-local.gob.mx)
10. **Frank M. White.** 1988. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. ISBN: 968-451-581-2 México. Pp. 1-47, 190-197, 429-480
11. **Ibañez, M., Rossell, J.R. y Rossell, J.I.** 2005. “Tecnología Solar”. Ed. Mundi-Prensa, ISBN: 84-8476-199-1, Madrid (España).

- 
12. **Ife Fitz James, Bas Kuipers.** 2003. Preservation of fruit and vegetables, Ed. Bas Kuipers. ISBN:9077073302. Agromisa Foundation, Wageningen..
  13. **Incropera, Frank P.** 1999. Fundamentos de transferencia de Calor, 4ª edición. Ed. Prentice-Hall, ISBN: 970-07-0170-4. México.
  14. **J. P. Holman.** 1996. Transferencia de Calor. CECSA, ISBN: 968260649-7 México. Pp. 26,27, 192-241, 299-327.
  15. **James J. Duders. Martin.** 1983. Transport Theory. CECSA. ISBN: 968-26-0390-0 México
  16. **Jan Remud And Stefan Kuns,** 2004. Meteonorm 5.1, Meteotest Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern. Pág WEB [www.meteonorm.com](http://www.meteonorm.com)
  17. **José Manuel López-Cózar,** 2006. “Energía Solar Térmica” Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía. C/Madera, 8 E28004-Madrid Octubre
  18. **Juan Francisco Coronel Toro.** Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor. Dpto. de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla.  
Pág WEB:  
[http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion\\_tablas\\_graficas\\_TC.pdf](http://www.esi2.us.es/~jfc/Descargas/TC/Coleccion_tablas_graficas_TC.pdf)
  19. **Kalogirou, Soteris A.** 2009. Solar energy and systems engineering: processes Academic Press ISBN: 9780123745019. San Diego CA. pp. 72-180
  20. **Landau<sup>y</sup>Lifshitz.** 1991. Curso de física teórica. Volumen 1 Mecánica 2ª edición, Ed. Reverté S.A.ISBN:84-291-4081-6. España pp.1-5, 158-180
  21. **M.I. Elvira Juárez Hernández.** Uso de la Energía Solar en Deshidratación de Frutas y Verduras. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Facultad de Ingeniería Química. México. Pp. 1-5  
[http://www.cienciasaplicadas.buap.mx/convocatoria/memorias\\_2005/017.pdf](http://www.cienciasaplicadas.buap.mx/convocatoria/memorias_2005/017.pdf)
  22. **María José Montes Pita,** 2008. Análisis y Propuestas de Sistemas Solares de Alta Exergía que Emplean Agua Como Fluido Calorífero. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales Universidad Politécnica de Madrid. Tesis Doctoral Madrid. Pp. 2-7, 70-76.
  23. **Martínez-Val et al.** 2004. “La Energía en sus claves”. Ed. Fundación Iberdrola,. ISBN:84-609-1337-6. Madrid (España).
  24. **Michael M. Abbott, Hendrick C. Vanness.** 1991. Termodinámica. Ed. McGraw-Hill Interamericana. ISBN:968-422793-0. Mexico D.F. pp. 4-14

- 
25. **Microelectronics Heat Transfer Laboratory.** 1997. Fluid Properties Calculator. Copyright.  
<http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>
  26. **Murray R. Spiegel.** 1967. Theory and Problems of Theoretical Mechanics. Schaum Publishing Co. Copyright © New York. EUA. Pp. 33-55, 282-332
  27. **Pedro Fernández Díez.** Procesos Termosolares En Baja, Media Y Alta Temperatura <Http://libros.redsauce.net/>
  28. **Ramiro Betancourt Grajales,** Transferencia Molecular De Calor, Masa Y/O Cantidad De Movimiento.
  29. **Roger R. Bate, Donald D. Mueller, Jerry E. White,** 1971. Fundamentals of Astrodynamics. Dover Publications, Inc. ISBN: 0-486-60061-0 New York.. Pp. 51-109
  30. **S. P. Sukhatme. J. K. Nayak** 2008. Solar Energy, principles of thermal collection and storage, Tata-McGraw Hill. ISB(13): 978-0-07-026064-1, ISBN(10): 0-07-026064-8. New Delhi. Pp. 7-193
  31. **Solartronic, S.A. de C.V** 1997- 2007 Copyright © Pág WEB:  
[http://www.solartronic.com/Energia\\_Solar/Radiacion\\_Solar/Meteororm/](http://www.solartronic.com/Energia_Solar/Radiacion_Solar/Meteororm/)
  32. **V. Passamai,** 1997. Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. INENCO – CIUNSa – CONICET. Facultad de Ciencias Exactas Av. Bolivia 5150 – 4400 Salta. R. Argentina 2000.
  33. **Wertz. James R.** Spacecraft Attitude determination and control, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 90-277-0959-9 ISBN:90-277-1204-2. USA. Pp 24-32
  34. **William Tyrrell Thompson.** 1986. Introduction Space Dynamics, Dover Publications, Inc. ISBN:0-486-65113-4 New York. Pp. 261-279
  35. **Winter, C.J., Sizmann, R.L., Vant-Hull, L.L.,** 1991. “Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics”. Ed. Springer-Verlag, ISBN: 3-540-18897-5. Berlín.
  36. **Jerry Jon Sellers.** 1994. Understanding Space and introduction to astronautics. Ed. McGraw-Hill Inc. ISBN: 0-07-057027-5. USA. Pp. 95-110, 140-160.
  37. **Yonus A. Çengel.** 2007. Heat and Mass Transfer: A practical Approach. McGraw-Hill Companies. ISBN-13: 9-8-0-07-312930-3. ISBN-10: 0-07-312930-5. USA. Pp. 459-515.

---

## Símbolos y abreviaturas.

---

$\theta$	Ángulo de incidencia
$\eta$	Eficiencia
$\Phi$	Ángulo zenital
$\tau$ :	Transmisividad de una superficie.
$\sigma$ :	Constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )
$\rho$ :	Reflectividad de una superficie.
$\nu$	Viscosidad cinemática.
$\mu$	Viscosidad.
$\theta$ :	Angulo de incidencia.
$\varepsilon$ :	Emisividad de una superficie.
$\delta$	Declinación,
B	Ángulo de la superficie inclinada desde la horizontal
$\alpha$ :	Absorbancia de una superficie.
$\alpha$	Difusividad térmica.
z	Ángulo azimutal
$U_L$	Coefficiente Global de pérdidas de calor
$T_p$ .	Temperatura de placa
$T_{amb}$	Temperatura ambiente
$T^*$ :	Temperatura máxima o temperatura de equilibrio radiante.
S:	Cantidad de energía absorbida por unidad de tiempo y área, por un colector solar.
Ra	Numero de Rayleigh
$Q_u$	Calor Útil
Q	Flujo de calor

---

Pr	Numero de Prandtl
Nu	Numero de Nuselt
L	Latitud local
K	Conductividad térmica.
Ie:	Intensidad de radiación.
$h_{ss}$	Angulo horario de salida y puesta del sol
H	Angulo horario
Gtr:	Radiación incidente que es transmitida por la superficie.
Gsc:	Constante solar (1.353 kW/m <sup>2</sup> ).
Gref:	Radiación incidente que es reflejada por la superficie.
Gon:	Irradiación solar extraterrestre.
GOH	Radiación para una superficie Horizontal
Gabs:	Radiación incidente que es absorbida por la superficie.
G:	Irradiación, flujo de energía radiante que incide sobre una superficie.
g	Constante gravitacional (9.81m/s <sup>2</sup> )
Eb:	Potencia emisiva del cuerpo negro.
E:	Potencia emisiva de una superficie.
Cp	Capacidad calorífica a presión constante.
C:	Razón de concentración geométrica.
C	Razón de concentración geométrica
$\rho_g$	Reflectancia del suelo
$\beta'$	Coefficiente de expansión volumétrica.
$\alpha_n$ :	Absorbancia a incidencia normal.
$r_{\perp}$	Radiación paralela para superficies suaves.



---

$r_{\parallel}$	Radiación perpendicular para superficies suaves.
$R_b$	Factor de inclinación de radiación directa
$I_d$	Radiación difusa
$I_b$	Radiación directa
$A_c$	Área de colección
$h_c$	Coefficiente de transferencia de calor por convección

## Anexos

---

### Anexo I

---

Radiación teórica mensual promedio por hora.

---

	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
<b>ENE</b>	0	0	1	97.6	291	470.6	623.1	701.1	672.7	571.1	449.3	287.8	98.4	1.9	0	0
<b>FEB</b>	0	0	7.2	147.1	358.8	588.6	722	781.7	747	655.9	487.2	366.6	169.4	11.9	0	0
<b>MAR</b>	0	2.7	70.3	283.1	520.5	716.6	871.4	931.7	937	789.3	692.4	495.5	255.7	59.8	0	0
<b>ABR</b>	0	20	167.8	401.5	618.7	793.7	897.8	935.1	908.5	834.4	748.1	529	303.2	93.2	5.4	0
<b>MAY</b>	0	45	203.9	412.3	621.5	787.1	881.8	919.6	889.9	859	727.3	560.7	333.3	135.5	22.9	0
<b>JUN</b>	1	65	241.7	454.7	656.8	818	886.3	938.9	931.9	873.1	740.7	588.1	360.7	159.3	30.6	0
<b>JUL</b>	9	40	193.2	386.4	570.4	735.5	829.8	884.7	849.7	805.3	715.9	559.5	349.5	156.1	32.5	0
<b>AGO</b>	0	21	160.1	361.6	577.9	766.4	870.8	936.6	890.9	823.1	672.5	457.8	247.8	90	10.4	0
<b>SEP</b>	0	6.1	117.9	322.3	580.9	781.6	899.4	936.9	882	735.6	653.4	450.1	224.1	43	0	0
<b>OCT</b>	0	0.9	81.6	286.2	517.7	708.3	845.3	893.2	848.2	666.4	546.7	334.2	118.5	7.6	0	0
<b>NOV</b>	0	0	23.2	196.6	411.4	597.6	703.4	752.3	710.2	573.9	405.9	226.5	38.3	0	0	0
<b>DIC</b>	0	0	3.5	130.4	337.3	510.4	631.1	693.1	662.3	561.6	357.5	218.3	29	0	0	0

---

## Anexo II

---

### Calor teórico útil por hora & mes

---

	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>ENE</b>	0	0	3.47	42.47	78.67	109.4	125.1	119.4	98.93	74.38	41.82	3.638	0	0
<b>FEB</b>	0	0	13.46	56.05	102.5	129.4	141.4	134.4	116	82.02	57.71	17.95	0	0
<b>MAR</b>	0	0	40.87	88.73	128.3	159.5	171.6	172.2	142.9	123.4	83.69	35.35	0	0
<b>ABR</b>	0	17.63	64.74	108.5	142.8	164.8	172.3	167	152	134.6	90.45	44.95	2.589	0
<b>MAY</b>	0	24.91	66.92	109.1	142.5	161.6	162.9	163.2	157	130.4	96.48	10.67	11.12	0
<b>JUN</b>	0	32.53	75.47	116.2	148.7	162.5	173.1	171.7	159.8	133.1	102.4	56.52	15.91	0
<b>JUL</b>	0	22.75	61.7	98.79	132.1	151.1	162.2	155.1	146.1	128.1	96.59	54.26	15.27	0
<b>AGO</b>	0	16.8	56.7	100.3	140.3	159.4	172.6	163.4	149.7	119.4	76.09	33.76	1.941	0
<b>SEP</b>	0	7.56	48.78	100.9	141.4	165.1	172.7	161.6	132.1	115.5	74.52	28.98	0	0
<b>OCT</b>	0	0.25	41.5	88.17	126.6	154.2	163.9	154.8	118.1	94.01	51.17	7.69	0	0
<b>NOV</b>	0	0	23.43	66.74	104.3	125.6	135.5	127	99.5	65.63	29.46	0	0	0
<b>DIC</b>	0	0	10.09	51.8	86.7	111	123.5	117.3	97.02	55.87	27.81	0	0	0

---

### Anexo III

---

#### Radiación medida mensual promedio por hora.

---

h	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ENE	0	0	1.447	141.23	421.08	680.96	901.626	1014.5	973.3969	826.38	650.14	416.45	142.38	2.7493	0
FEB	0	0	9.36	191.23	466.44	765.18	938.6	1016.2	971.1	852.67	633.36	476.58	220.22	15.47	0
MAR	0	3.186	82.954	334.06	614.19	845.59	1028.25	1099.4	1105.66	931.37	817.03	584.69	301.73	70.564	0
ABR	0	22.62	192.634	460.92	710.27	911.17	1030.67	1097.8	1042.958	957.89	858.82	607.29	348.07	106.99	6.2
MAY	0	52.73	241.622	488.58	736.48	932.71	1044.93	1089.7	1054.532	1017.9	861.85	664.43	394.96	160.57	27.1
JUN	1.378	74.51	277.472	522	754.01	939.06	1017.47	1077.9	1069.821	1002.3	850.32	675.14	414.08	182.88	35.1
JUL	10.68	45.58	221.794	443.59	654.82	844.35	952.61	1015.6	975.4556	924.48	821.85	642.31	401.23	179.2	37.3
AGO	0	24.24	183.955	415.48	664.01	880.59	1000.55	1076.2	1023.644	945.74	772.7	526.01	284.72	103.41	11.9
SEP	0	7.009	135.467	370.32	667.45	898.06	1033.41	1076.5	1013.418	845.2	750.76	517.16	257.49	49.407	0
OCT	0	1.08	97.92	343.44	621.24	849.96	1014.36	1071.8	1017.84	799.68	656.04	401.04	142.2	9.12	0
NOV	0	0	31.32	265.41	555.39	806.76	949.59	1015.6	958.77	774.77	547.97	305.78	51.705	0	0
DIC	0	0	5.0645	188.69	488.07	738.55	913.202	1002.9	958.3481	812.64	517.3	315.88	41.963	0	0

---

## Anexo IV

---

### Calor medido útil por hora & mes

---

	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ENE	0	3.9107	47.864	88.661	123.294	140.99	134.5638	111.49	83.826	47.131	4.1	0
FEB	0	15.169	63.168	115.52	145.834	159.36	151.4688	130.73	92.437	65.039	20.23	0
MAR	0	46.06	99.999	144.59	179.757	193.39	194.0694	161.05	139.07	94.319	39.839	0
ABR	19.869	72.962	122.28	160.94	185.73	194.18	188.209	171.3	151.69	101.94	50.659	2.9178
MAY	28.0736	75.419	122.96	160.6	182.123	183.59	183.9264	176.94	146.96	108.73	12.025	12.532
JUN	36.6613	85.055	130.96	167.58	183.138	195.08	193.5059	180.09	150	115.4	63.698	17.931
JUL	25.6393	69.536	111.34	148.88	170.29	182.8	174.7977	164.65	144.37	108.86	61.151	17.209
AGO	18.9336	63.901	113.04	158.12	179.644	194.52	184.1518	168.71	134.56	85.753	38.048	2.1875
SEP	8.52012	54.975	113.71	159.36	186.068	194.63	182.1232	148.88	130.17	83.984	32.66	0
OCT	0.28175	46.771	99.368	142.68	173.783	184.72	174.4596	133.1	105.95	57.669	8.6666	0
NOV	0	26.406	75.216	117.55	141.551	152.71	143.129	112.14	73.965	33.201	0	0
DIC	0	11.371	58.379	97.711	125.097	139.18	132.1971	109.34	62.965	31.342	0	0

Alfabeto griego

Nombre de letra	Mayúsculas	Minúsculas	Nombre de letra	Mayúsculas	Minúsculas
Alfa	A	$\alpha$	Ni	N	$\nu$
Beta	B	$\beta$	Xi	$\Xi$	$\xi$
Gamma	$\Gamma$	$\gamma$	Ómicron	O	$o$
Delta	$\Delta$	$\delta$	Pi	$\Pi$	$\pi$
Épsilon	E	$\epsilon$	Ro	P	$\rho$
Dseda	Z	$\zeta$	Sigma	$\Sigma$	$\sigma$
Eta	H	$\eta$	Tau	T	$\tau$
Theta	$\Theta$	$\theta$	Ípsilon	$\Upsilon$	$\upsilon$
Iota	I	$\iota$	Fi	$\Phi$	$\phi$
Kappa	K	$\kappa$	Ji	X	$\chi$
Lambda	$\Lambda$	$\lambda$	Psi	$\Psi$	$\psi$
Mi	M	$\mu$	Omega	$\Omega$	$\omega$