



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**DISEÑO DE LA ESTACIÓN SOLARIMÉTRICA DE LA
UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

TRABAJO MONOGRÁFICO

Para obtener el Grado de

Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

CHRISTIAN IRÁN PÉREZ LEÓN

SUPERVISORES

M.E.S. ROBERTO ACOSTA OLEA
DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA
M.C. JAVIER VÁZQUEZ CASTILLO

Chetumal, Quintana Roo, Febrero 2007



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
División de Ciencias e Ingeniería

Trabajo monográfico elaborado bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

COMITÉ

Supervisor: M.E.S. Roberto Acosta Olea _____

Supervisor: Dr. Joel Omar Yam Gamboa _____

Supervisor: M.C. Javier Vázquez Castillo _____

Chetumal, Quintana Roo, Febrero de 2007



Dedicatoria

A mi padre **Dionisio Pérez** que a pesar de los duros caminos que hemos enfrentado supo apoyarme con lo que fuera necesario para que cumpliera con mi objetivo, que con mucho esfuerzo he logrado.

Después de todo...

¡¡Muchísimas gracias Papá!!

A mis hermanos:

Suemi una gran bióloga un ejemplo a seguir y a mi sobrino **Ariel** "cachetes".

Yareli y a mi otro futuro sobrino, para que le eche ganas a todo.

Dionisio por el apoyo que ha hecho hasta ahora.

¡¡Con mucho amor para ellos!!

A mi madre **Guadalupe León** por todo su apoyo, amor y comprensión y demostrarle que si se puede y que este orgullosa de mi.

Muchas gracias Mamá

A mis amigos y compañeros de clase:

- Lidieth Gutiérrez
- Francisco Núñez
- Marcial Sánchez
- Mefi Flores
- Lizbeth Morales

A los cinco que estuvieron conmigo hasta el final y poder contar con su apoyo.

Al M.C. **Abraham Güemez**, a su hijita **Estrella** y a **Antonia Estrella** por la paciencia, apoyo y confianza que me ha otorgado hasta el momento.

Y a todos aquellos que no se rinden y que luchan por alcanzar sus metas sin importar que tan difícil sea el camino que tengan que recorrer.

Para mi este trabajo significa mucho, no simplemente el hecho de que con el puedo obtener el "grado de ingeniero" por que para eso, se necesita mucho más, mucho más que ir a la escuela y prestarle la atención a los maestros, sino que con este trabajo puedo decir que he terminado una faceta de mi vida y a partir de este momento me siento muy orgulloso por llegar hasta este punto y poder empezar una nueva etapa de mi vida.



Agradecimientos

Quiero agradecer al **M.E.S.** y amigo **Roberto Acosta Olea** que a mediados de mi carrera acepto ser mi tutor y maestro en clases, que gracias a su esfuerzo y dedicación me apoyo y dirigió esta monografía.

Al **M.C. Javier Vázquez** por ser como un compañero y contar con su apoyo en la revisión de este trabajo.

Quiero dar un agradecimiento muy especial a **Dios** por estar siempre conmigo dándome la fuerza necesaria para seguir adelante y seguir de pie, por que sólo él sabe cual fue mi camino para llegar hasta aquí, por que se que ahí estará en los momentos mas duros de mi vida y cuando más lo necesite.

Al **Dr. Joel Omar Yam Gamboa** por darme la confianza y agradecer por ser parte de este logro, aún que nunca me dio clases y no tuve el gusto de tratarlo más, es sin duda una de las personas que más respeto le tengo.

A **Gabriel Chan** por la gran ayuda que me brindo en la elaboración de este trabajo.

A la **Universidad de Quintana Roo** en especial a la **División de Ciencias e Ingenierías (DCI)**, por el apoyo de la impresión y encuadernación de este trabajo.

¡¡MUCHAS GRACIAS!!



Contenido

Resumen	III
Nomenclatura	IV
Lista de figuras	V

Capítulo 1: Introducción

1.1 Introducción	1
1.2 El Sol.....	2
1.3 Radiación solar sobre la superficie de la Tierra	5
1.4 Solarimetría	6
1.5 Objetivo principal.....	8

Capítulo 2: Técnicas y Métodos de Medición

2.1 Estimación con base de modelos físicos y empíricos.....	9
2.2 Estimación con base en mediciones satelitales	10
2.3 Estimación con base en Atlas de radiación.....	11
2.4 Medición directa de la radiación solar	13
2.5 Instrumentos de medición de la radiación solar.....	16
2.5.1 Piranómetro.....	16
2.5.2 Pirheliómetro	17
2.5.3 Heliógrafo.....	18
2.5.4 Actinógrafo o Piranógrafos.....	18
2.6 Características de los instrumentos de medición	19

Capítulo 3: Montaje e Instalación

3.1 Selección del sitio para la estación solarimétrica.....	21
3.2 Diseño y construcción de la base de los piranómetros	22
3.2.1 Construcción de La Base 1	23
3.2.2 Construcción de La Base 2	25
3.2.3 Ensamble de las bases.....	29



3.3 Piranómetros y sistema de adquisición de datos.....	30
3.3.1 Piranómetros	30
3.2.3 Sistema de adquisición de datos	32
3.4 Armado de la estación solarimétrica	34

Capítulo 4: Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones	37
4.2 Recomendaciones	38
Referencias.....	39
Anexos	41



Resumen

Este trabajo monográfico desarrolla el diseño y construcción de una estación solarimétrica para la Universidad de Quintana Roo la cual cuenta con cuatro capítulos los cuales se describen brevemente a continuación:

En el primer capítulo de manera general se da una introducción al tema de la solarimetría. Se inicia con una reflexión de la importancia de las energías renovables así como algunas de sus ventajas y desventajas de las mismas y de lo primordial que es cuantificar estos recursos. Se describen brevemente las características principales del Sol, así como el efecto de radiación solar sobre la superficie terrestre. Conocer un poco a fondo sobre el tema de solarimetría y como es reflejada para este trabajo. Específicamente se dan a conocer las justificaciones para posteriormente plantear los objetivos de esta monografía.

En el segundo capítulo se describen brevemente cuatro de los métodos más comunes para el cálculo de la radiación solar. Especialmente se aborda con cierta profundidad el método de medición directa y algunos tipos de sensores, en donde se detallan los diferentes tipos de instrumentos empleados así como se mencionan las ventajas y desventajas de los mismos y sus características.

En el tercer capítulo se atiende el principal objetivo de este trabajo monográfico, que es la construcción de los dos componentes que conforman la Estación Solarimétrica, y esta estructurada de la siguiente manera: selección de materiales, medidas, cortes, ensambles, soldaduras y la aplicación de pintura anticorrosiva para las bases de los piranómetros. Posteriormente se presenta el sistema de adquisición de datos y algunas características así como los piranómetros con los que cuenta la universidad de Quintana Roo y la instalación de todos estos elementos en conjunto para dar como resultado la Estación solarimétrica.

Finalmente en el cuarto capítulo se describen, de la manera más clara posible, de que forma fueron cumplidos los objetivos principales y los particulares así como las recomendaciones para el mantenimiento que se le tiene que dar a la estación solarimétrica.



Nomenclatura

CA	Corriente alterna	W	Watts
CD	Corriente directa	MW	Megawatts
V	Voltaje	W-h	Watts hora
VCA	Voltaje en corriente alterna	W/m ²	Watts sobre metro cuadrado
VCD	Voltaje en corriente directa	kW	Kilowatts
mm	Milímetro	kWh.	Kilowatts hora
cm	Centímetro	G _b	Radiación Directa
cm ²	Centímetro al cuadrado	G _d	Radiación Difusa
m	Metro	G _T	Radiación Global
m ²	Metro cuadrado	λ	Longitud de onda electromagnética
km.	Kilómetro	UV	Ultravioleta
km ²	Kilómetro al cuadrado	s	Segundo
D	Diámetro mayor	MJ/m ² /dia	Megajoules metro cuadrado día
d	Diámetro menor	kWh/m ² /dia	Kilowatts hora metro cuadrado día
L	Longitud	μV/W/m ²	Nanovolts watts metro cuadrado
h	Altura	μm	Nanómetros
e	Espesor	μs	Nanosegundos



Tabla de figuras

Nº	<u>Descripción</u>	Pág.
1.-	Ejemplos de contaminación ambiental.	1
2.-	Estrella solar (fotografía NASA).	2
3.-	Reacciones nucleares del Sol (fotografía NASA).	3
4.-	Esquema de la radiación solar.	3
5.-	Almacenamiento natural de la energía solar de la Tierra.	4
6.-	Diagrama de la radiación solar sobre la superficie terrestre.	5
7.-	Imagen del software donde se observan la ubicación de estaciones en las diferentes partes del mundo.	10
8.-	Ejemplo de diagrama de radiación solar por el método satelital.	11
9.-	Isolneas de insolación promedio anual para México, en MJ/m ² /día; adaptado de (Galindo y Valdés, 1992).	12
10.-	Mapa de insolación anual obtenido a partir del modelo de la NASA (NASA, 2005).	12
11.-	Mapa de radiación solar obtenido a partir del modelo de la NASA (NASA, 2005.).	13
12.-	Voltaje de Seebeck.	14
13.-	Termopila.	14
14.-	Termopila en estrella para piranómetros.	14
15.-	El espectro solar.	15
16.-	Piranómetro Black and White, Eppley.	16
17.-	Componentes de un piranómetro.	16
18.-	Piranómetro con banda sombreadora.	16
19.-	Diferentes accesorios del Pirheliómetro.	17
20.-	Diagrama de los componentes de un pirheliómetro.	17
21.-	Diagrama de medición de la radiación solar directa con un pirheliómetro.	17
22.-	Distintos modelos de heliógrafos de Campell-Stokes..	18
23.-	Actinógrafo.	18
24.-	Sitio seleccionado en la azotea del taller de ingenieras.	21
25.-	Diseño y características de la Base 1.	22
26.-	Diseño y características de la Base 2.	22
27.-	Características y dimensiones de cada una de las cuatro piezas de la Base 1.	23



Nº	<u>Descripción</u>	Pág.
28.-	Sujetadores de acero.	23
29.-	Tubo PTR galvanizado.	23
30.-	Tabla pequeña de acero para la base del piranómetro.	24
31.-	Proceso de soldadura de la columna con la placa.	24
32.-	Soldadura de la primera placa sujetadora.	24
33.-	Soldadura de la segunda placa sujetadora.	24
34.-	Finalmente quedo soldada la Base 1 completamente.	24
35.-	Aplicación de minio de plomo (pintura anticorrosiva).	24
36.-	Características y dimensiones de cada una de las cinco piezas de la parte inferior de la Base 2.	25
37.-	Corte de la placa de acero	25
38.-	Soldadura de las cinco piezas.	25
39.-	Características y dimensiones de la columna de soporte.	26
40.-	Corte de la columna.	26
41.-	Corte de la columna.	26
42.-	Aplicación de minio de plomo.	26
43.-	Dimensiones y características de cada una de las 3 piezas de la parte superior de la Base 2.	27
44.-	Ensamble de la placa de tensores.	27
45.-	Ajuste del tubo con la placa de tensores y su base.	28
46.-	Muestra de ensamble de la Base 2.	28
47.-	Preparación de soldadura para las tres piezas.	28
48.-	Soldadura de las tres piezas.	28
49.-	Aplicación de minio de plomo.	28
50.-	Rollo de tensor para sostener la Base 2.	28
51.-	Colocación del tornillo de 1/2".	29
52.-	Ajuste de la placa de tensores al colocar la Base 2.	29
53.-	Ajuste de tensores en la pared con guarda cabos.	29
54.-	Imagen del ensamble de las tres partes de la Base 2.	29
55.-	Piranómetros Eppley 8-48.	30
56.-	Piranómetros Eppley 8-48 con banda sombreadora.	30
57.-	Cable de conexión del piranómetro al adquisidor de datos	31
58.-	Datalogger básico modelo CR510, Campell Scientific Inc.	32



Nº	<u>Descripción</u>	Pág.
59.-	Modulo solar monocristalino de 10 watts, cargado de suministrar energía a la batería del equipo.	33
60.-	Adquisidor de datos, Campell Scientific Inc.	33
61.-	Suministro de energía a 12 Volts PS100	33
62.-	Batería interna del PS100, la cual recibe toda la energía que arroja el modulo fotovoltaico y la almacena.	33
63.-	Caja protectora contra el medio ambiente PLV100 con disecador de humedad.	33
64.-	Colocación de la banda sombreadora en la Base 2 antes de pintarla.	34
65.-	Nivelación de los piranómetros.	34
66.-	Instalación del adquisidor de datos en la base 2.	34
67.-	Instalación del modulo fotovoltaico al adquisidor de datos.	34
68.-	Conexión del piranómetro al adquisidor de datos.	35
69.-	Conexión del modulo fotovoltaico a la batería.	35
70.-	Conexión de la batería hacia al adquisidor de datos.	35
71.-	Armado final de la estación solarimétrica, radiación directa (Base 1).	36
72.-	Armado final de la estación solarimétrica, radiación difusa (Base 2).	36



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta, de manera general, una introducción al tema de la solarimetría. Se inicia con una reflexión de la importancia de las energías renovables y de lo primordial que es cuantificar estos recursos. Específicamente se dan las justificaciones de este trabajo monográfico. Se describen brevemente las características físicas principales del Sol, así como el efecto de la radiación solar sobre la superficie terrestre y posteriormente se plantean los objetivos de esta monografía

1.1 Introducción

A partir de la Revolución Industrial las reservas de origen fósil, como el carbón y el petróleo, han abastecido energéticamente al mundo. Al ser ya previsible el agotamiento de éstas, es preciso considerar su conservación. Adicionalmente el uso de estas fuentes ha traído grandes problemas de contaminación (figura 1), por lo que es necesario poner un alto a la contaminación por el uso de estas energías. Los principales problemas son: el efecto invernadero, la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono, entre otros efectos. Debido a lo anterior es necesario optar por el empleo de otras fuentes energéticas más naturales con el medio ambiente y que no se agoten (Manrique, 1984). Las energías renovables emergen como una alternativa y ofrecen amplias posibilidades de tener los mismos desarrollos tecnológicos y científicos actuales. Las energías renovables son, junto con el ahorro y el uso eficiente de la energía, la llave para un futuro energético limpio, eficaz, seguro y autónomo.



Figura 1. Ejemplos de Contaminación ambiental.

Se le llama energía renovable la que, administrada en forma adecuada, puede explotarse ilimitadamente, es decir, su cantidad se encuentra disponible y no disminuye a medida que se aprovecha en la Tierra. Dicho en otras palabras; Se dice que un recurso es renovable cuando su tasa de regeneración es mayor a la tasa de utilización.

Entre las principales ventajas y desventajas de las energías renovables, están:

Ventajas

- Promueven la conservación de recursos no-renovables.
- Para fines prácticos el recurso es inagotable.
- El recurso energético es “gratis”.
- Permiten el acceso de áreas remotas a los servicios de electricidad.
- Su costo no depende de las políticas mundiales de los precios de gas y petróleo.



- Generan menores impactos ambientales.
- Pueden ser motor de desarrollos regionales.
- En general se utilizan equipos de fácil uso, modulares y larga vida útil.

Desventajas

- Su disponibilidad es intermitente.
- Depende de las condiciones climatológicas del lugar.
- Baja eficiencia energética, se requieren grandes extensiones de terreno.
- En algunas aplicaciones todavía se encuentra en validación experimental.
- Altos costos de Inversión inicial.
- El kW-h suele ser más caro que la energía convencional
- Financiamiento complejo.

Dentro de las energías renovables, la **Energía Solar** ofrece una gran oportunidad para aprovecharla, ya que puede ser utilizada para diversas aplicaciones, tales como son: producción de trabajo mecánico, calentamiento de agua para consumo doméstico, procesos de secado, destilación de agua, calefacción y enfriamiento de ambientes, bombeo de agua y/o generación de cantidades moderadas de electricidad para áreas rurales remotas, entre otras (Manrique, 1984).

Debido a que el Sol es la principal fuente de energía, es importante conocer la cantidad de radiación solar y la dirección en la que ésta llega a la superficie terrestre. Con el objetivo de instalar de manera adecuada elementos y/o dispositivos para aprovechar de una manera óptima esta energía (como por ejemplo instalar un módulo fotovoltaico para la producción de energía eléctrica o instalar un calentador solar de agua).

1.2 El Sol

El Sol es una estrella cuyo diámetro es de aproximadamente 1, 400,000 km, 100 veces mayor que el diámetro de la Tierra (Duffie y Beckman, 1991). El Sol nos calienta y nos ilumina: gracias a su calor y a su luz puede haber vida en la Tierra, ya que todo el combustible y los alimentos proceden en última instancia de las plantas que utilizan la energía de la luz del Sol. El Sol es la esencial de nuestro sistema planetario (figura 2).



Figura 2: Estrella Solar (fotografía NASA).

La masa del Sol está compuesta de un 75% de hidrógeno y 25% de Helio. Otros elementos químicos más pesados que el helio son denominados "metales" y no sobrepasan el 0.1%. La distancia media Sol - Tierra, es de 150 millones de kilómetros (máxima 152,106, 000 de km y mínima 143,103, 000 de km).

La energía solar se crea en el interior del Sol. Donde la temperatura y la presión alcanzan



valores de aproximadamente 1.5×10^7 K y $p_e = 2.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$ respectivamente, a manera de comparación, la presión atmosférica a nivel del mar es de aproximadamente $1 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$, estas condiciones permiten que se lleven a cabo las reacciones nucleares. Las reacciones nucleares más importantes en estrellas como el Sol son las reacciones de fusión las cuales producen un núcleo de helio a partir de cuatro de núcleos de hidrogeno. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso se liberan 5 millones de toneladas de energía pura; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero.

La energía radiante producida en el Sol como resultado de reacciones nucleares de fusión (conversión de Hidrógeno en Helio, figura 3), llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre (Hamilton, 1997). La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera, si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol, se llama constante solar¹, y su valor medio es de 1353 W/m^2 aproximadamente. Sin embargo, esta cantidad no es constante, ya que varía un 0,2% en un periodo de 30 años (Encarta, 2006). La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera, un ejemplo de esto se presenta en la figura 4.



Figura 3. Reacciones nucleares del Sol (fotografía NASA).



Figura 4. Esquema de la radiación solar.

¹ La constante solar: se define como la cantidad de energía por unidad de tiempo que recibe del Sol una superficie de área unitaria perpendicular a la radiación, fuera de la atmósfera, y a la distancia media del Sol a la Tierra.



El almacenamiento natural de energía solar se produce en la atmósfera, los océanos y las plantas de la Tierra. Las interacciones de la energía del Sol, los océanos y la atmósfera, por ejemplo, producen los vientos (utilizados durante siglos para hacer girar los molinos). Los sistemas modernos de energía eólica utilizan hélices fuertes, ligeras, resistentes a la intemperie y con diseño aerodinámico que, cuando se unen a generadores, producen electricidad para usos locales y especializados o para alimentar la red eléctrica de una región o comunidad.

Casi el 30% de la energía solar que alcanza el borde exterior de la atmósfera se consume en el ciclo del agua, que produce la lluvia y la energía potencial de las corrientes de montaña y de los ríos (Encarta, 2006).

La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende de forma complicada, pero predecible, del día, año, hora y la latitud. Además, la cantidad de energía solar que se puede acumular depende de la orientación del dispositivo receptor.

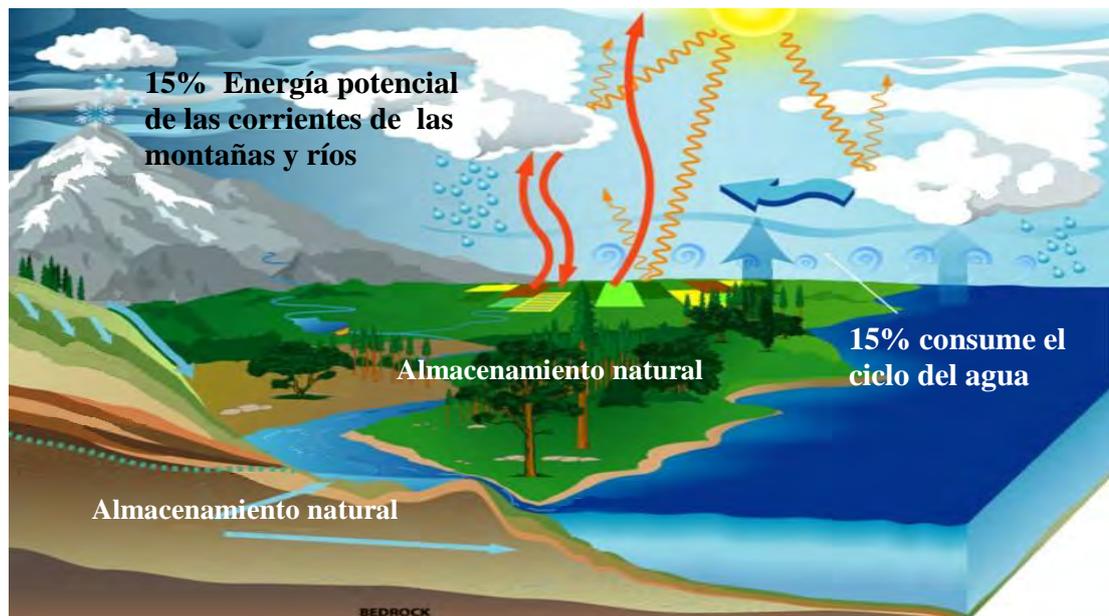


Figura 5. Almacenamiento natural de la energía solar de la Tierra.



1.3 Radiación solar sobre la superficie de la tierra

Una vez conocidas las características principales del Sol, en esta sección se describe la naturaleza de la radiación solar. No toda la radiación solar que intercepta la superficie terrestre es la misma, aún en condiciones de cielo despejado (figura 6).

Existen dos diferentes tipos de radiación solar que inciden sobre la superficie de la Tierra:

- Radiación Directa (G_b): Como su propio nombre indica, es la que proviene directamente del Sol. Es la radiación que corresponde al ángulo sólido limitado por el disco solar sin tener en cuenta la dispersión atmosférica.
- Radiación Difusa (G_d): Es aquella recibida de la atmósfera como consecuencia de la dispersión de parte de la radiación del sol en la misma. Esta energía puede ser aproximadamente un 15% de la radiación global en los días soleados, pero en los días nublados, en los cuales la radiación directa es muy baja, la radiación difusa representa un porcentaje mucho mayor. Por otra parte, las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que "ven" toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque solo "ven" la mitad de la semiesfera celeste. Corresponde a la radiación solar dispersada por los diferentes componentes de la atmósfera.

Radiación Global (o Total) (G_T): Es la suma de ambas radiaciones (directa y difusa) en términos prácticos.

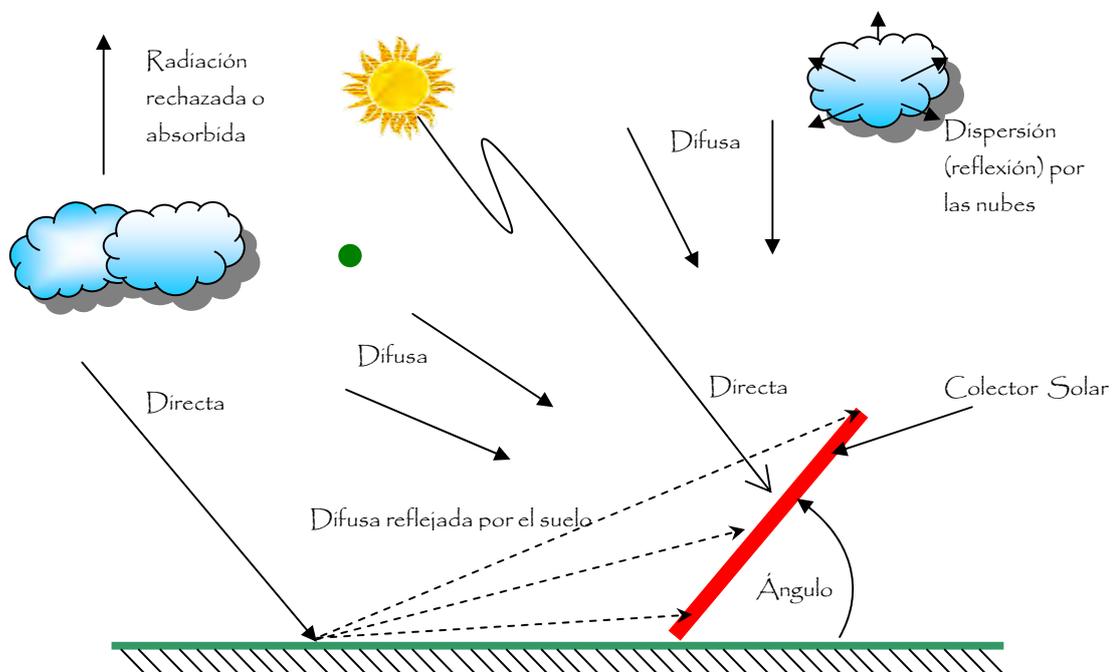


Figura 6. Diagrama de la radiación solar sobre la superficie terrestre.



1.4 Solarimetría

En el año de 1956 empiezan a efectuarse mediciones de radiación solar en el Instituto de Ciencia Aplicada. Posteriormente este se incorporo al Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México-UNAM. Actualmente se realizan mediciones de: duración de la insolación, radiación global, radiación difusa y radiación directa (flujos totales).

La solarimetría, también llamada actinometría, es la ciencia y tecnología de la medición de la energía de radiación de ondas electromagnéticas. No obstante, la energía solar es intermitente y difusa. Su baja intensidad es uno de los mayores obstáculos para el aprovechamiento mayor.

En este contexto, otras instituciones nacionales se han ido sumando al esfuerzo de contar con información (datos) solarimétrica, entre las que se pueden destacar: el Centro de Investigación en Energía y el Instituto de Geofísica ambos de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad de Sonora (Grupo de Energía), La Universidad de Colima, La Universidad Veracruzana y la Universidad Autónoma Metropolitana unidades Azcapotzalco e Iztapalapa. Todo este esfuerzo es debido principalmente a la falta de información en el ámbito climatológico y en especial a la falta de datos de radiación solar.

El material de observación obtenido en las mediciones de rutina ha sido básico para el desarrollo tanto de los diferentes proyectos de investigación relacionados con el aprovechamiento de la energía solar, así como la instalación de dispositivos o equipos que emplean la energía solar (calentadores, destiladores, estufas solares, sistemas fotovoltaicos, entre otros)

Uno de los objetivos de la Universidad de Quintana Roo (UQROO) tiene como finalidad involucrar a estudiantes en sus proyectos y así, generar futuros profesionistas e investigadores en el área de energías renovables en el estado, haciendo uso de su propia información obtenida y analizada en la misma institución. Los proyectos que se han puesto en marcha durante el tiempo pasado no han sido del todo racionales (por ejemplo se han instalados aerogeneradores en lugares con poco o nulo recurso eólico o sistemas de bombeo fotovoltaico en lugares con nublados en la mayor parte del año).

Específicamente para el caso del aprovechamiento de la energía solar, con este trabajo se pretende sentar las bases para tener una estación solarimétrica con la cual se puedan obtener datos confiables y continuos. Esto permitirá tomar mejores decisiones en la instalación de equipos solares, a su vez ayudara a conocer si su desempeño es el correcto, ya que de esto dependen mucho los costos para cualquier instalación.

Los estudios económicos de estas tecnologías dependen de la calidad del equipo así como los costos de operación y el porcentaje de radiación solar incidente. Si la radiación solar disponible en cierta localidad es menor que la estimada, el desempeño



será deficiente y las metas económicas no se alcanzaran. Por otro lado, si la radiación solar disponible en la localidad es mayor que la estimada, el desempeño y las proyecciones económicas pueden ser conservadores.

Actualmente en México, hay un gran interés por el aprovechamiento de la energía solar, esto ha permitido desarrollar algunos proyectos de gran importancia mundial, los cuales por muy diversas razones no se han logrado consolidar.

Hay varios esfuerzos realizados en instituciones nacionales para proporcionar de manera rutinaria y sistemática los requerimientos de información solarimétrica de calidad, esto con el fin de realizar adecuados diseños de los sistemas de conversión. Pero debido a que en muchas ocasiones no hay datos solarimétricos disponibles, ha traído como consecuencia que los diferentes usuarios generen sus propios datos para satisfacer sus necesidades de información, aunque los resultados no siempre sean de calidad.

Mucho se habla en nuestro País de la cantidad de energía solar que recibe, particularmente el estado de Quintana Roo se menciona como uno de los estados con mayor riqueza en radiación solar, la cuestión es: ¿con base a que datos se puede afirmar lo anterior?, ya que en la mayoría solo se menciona basándose en cuestiones empíricas, sin hacer referencia a datos confiables (ya sean medidos o estimados).

En el caso específico de la Universidad de Quintana Roo se pueden mencionar dos hechos importantes:

1) En el año 2000 se adquirieron dos Piranómetros Eppley modelo 8-48 (instrumentos de primera clase), uno de ellos cuenta con su banda sombreadora con el fin de medir radiación solar difusa y con el otro se mide radiación solar global o total. Estos instrumentos se usan de manera esporádica cuando se están realizando prácticas de laboratorio de las materias de Energía Solar Fotovoltaica, Energía Solar Fototérmica y Heliodiseño o cuando se requiere tener información para un proyecto específico.

2) En el Cuerpo Académico de Ingeniería en Sistemas de Energía se están desarrollando proyectos relacionados con el uso y aprovechamiento de energías renovables, específicamente solar y eólico.

Con base a lo anterior se puede mencionar que se tiene los elementos necesarios para contar con una estación solarimétrica permanente en la Universidad de Quintana Roo, la cual suministrara información confiable de radiación solar a los proyectos y prácticas que lo requieran. Con los datos obtenidos de radiación solar, se pretende caracterizar el potencial solar del sitio y confirmar si es óptimo o no para una aplicación dada. Adicionalmente se espera integrarse a la red de estaciones solarimétricas nacionales, la cual es coordinada por el Instituto de Geofísica de la UNAM y tener en un futuro cercano información solarimétrica nacional, que sirva para la toma de decisiones en la promoción e implantación de proyectos relacionados con el tema.



1.5 Objetivo principal

El objetivo principal de este trabajo monográfico es:

- El montaje de la estación solarimétrica de la Universidad de Quintana Roo.

Como objetivos particulares, se tienen:

- Diseñar y construir las bases que soportarán los piranómetros (incluye la selección de materiales).
- Seleccionar el sitio adecuado donde se instalará la estación solarimétrica.
- Seleccionar el sistema de adquisición de datos.
- Montaje de los equipos.
- Proporcionar recomendaciones del mantenimiento de la estación solarimétrica.



CAPÍTULO II

TÉCNICAS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN

En este capítulo se describen brevemente cuatro de los métodos más comunes para el cálculo de la radiación solar. Específicamente se abordará con cierta profundidad el método de medición directa, en donde se detallan los diferentes tipos de instrumentos empleados así como las ventajas y desventajas de los mismos.

Los cuatro métodos más comunes, usados para el cálculo de la radiación solar son:

1. *Estimación con base en modelos físicos y empíricos.*
2. *Estimación con base en mediciones de satélite.*
3. *Estimación con base en atlas de radiación.*
4. *Medición directa con instrumentos (piranómetros, pirheliómetros, radiómetros UV, etc.).*

2.1 Estimación con base en modelos físicos y empíricos

Los modelos para la estimación de la radiación solar se hacen necesarios, con el fin de hacer estimaciones de la cantidad de radiación solar en ciertos sitios de interés, en donde no se cuenta con mediciones.

En el pasado la medición de la radiación solar era poco común, de modo que los primeros modelos que se desarrollaron tenían como objetivo la determinación de la radiación solar global a partir de variables meteorológicas ampliamente medidas, como son la humedad, la precipitación pluvial, la cubierta de nubes y la insolación (horas de Sol brillante, también llamada heliofania). Al irse volviendo más común la medición de la radiación solar global se desarrollaron modelos para determinar los componentes directa y difusa ^[8].

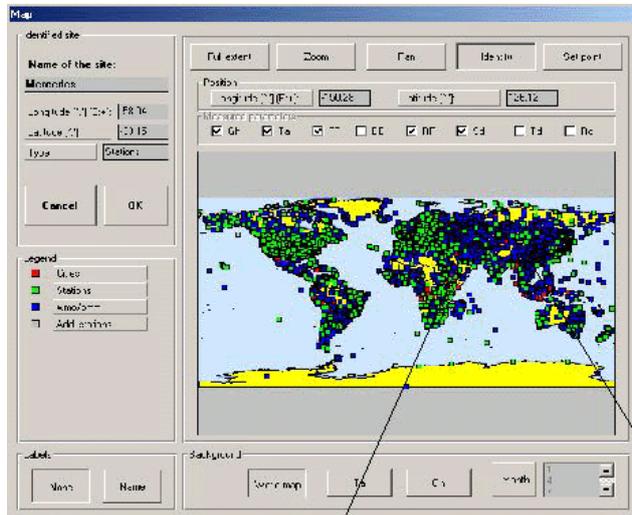
También se han desarrollado modelos basados en principios físicos (modelos teóricos) que buscan obtener valores de las componentes de la radiación solar a través de cálculos detallados. Sin embargo dichos modelos, aún en los casos más simples, requieren como datos de entrada una cantidad de información difícil de obtener, lo que les resta utilidad práctica. Existen una gran cantidad de estos modelos, los cuales tienen diferentes grados de complejidad, desde aquellos que con datos sencillos y disponibles se obtienen valores de radiación solar, hasta aquellos que necesitan una gran cantidad de datos (en muchas ocasiones difíciles de calcular o de obtener).

En un nivel intermedio entre los modelos empíricos y los basados en principios físicos, están los semi-empíricos.

Un ejemplo es el software conocido como **Meteonorm**, este es una base de datos meteorológica para cálculos de energía solar. Presenta un programa diseñado para calcular la radiación en cualquier parte del mundo a partir de una base de datos que posee

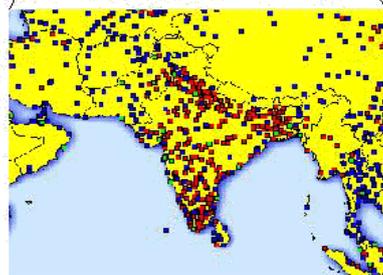


internamente, las cuales han sido obtenidas a través de las diversas estaciones meteorológicas, ubicadas en varias partes del mundo (como se puede observar en la figura 7).



Es de hacer notar que los valores que el software arroja son de: radiación solar global, difusa y directa en una superficie horizontal, también, estos valores se dan acumulados para el mes de interés, por lo cual para obtener el valor diario promedio de ese mes basta con dividir el valor acumulado entre el número de días que tiene el mes de análisis (Solartronic, 2003).

Figura 7: Imagen del software donde se observan la ubicación de las estaciones en las diferentes partes del mundo.



Aunque la escasez de datos medidos para México y otras partes del mundo hace que los modelos de los tipos descritos anteriormente y la información generada a partir de ellos sean de gran utilidad, en la actualidad han cobrado mucha mayor importancia los métodos para estimar la radiación solar y sus componentes a partir de datos proporcionados por las imágenes satelitales. Estos métodos se discuten a continuación.

2.2 Estimación con base en mediciones de satélite

Los satélites geoestacionarios llevan a cabo un monitoreo de la atmósfera y la cubierta de nubes de la tierra de manera continua en el tiempo y abarcando extensas regiones del mundo. La resolución sobre las regiones de gran cobertura geográfica es aproximadamente de 1 km², cuando se trata de imágenes en el espectro visible. Al ser la cubierta de nubes el parámetro que más influencia tiene sobre la radiación solar, esta capacidad de los satélites de brindar una información detallada de dicha cubierta se traduce en un importante potencial para evaluar el recurso solar (Renné et al, 1999). La gran ventaja de los métodos de estimación de radiación solar basados en datos satelitales



es precisamente su resolución espacial. Con ellos es posible generar mapas de radiación solar con una resolución muy detallada (de 1 a 10 km²) sobre regiones específicas. Esto los convierte en una fuente de información muy adecuada, por ejemplo, para ser integrada en Sistemas de Información Geográfica. Un ejemplo de este método se muestra en la figura 8.

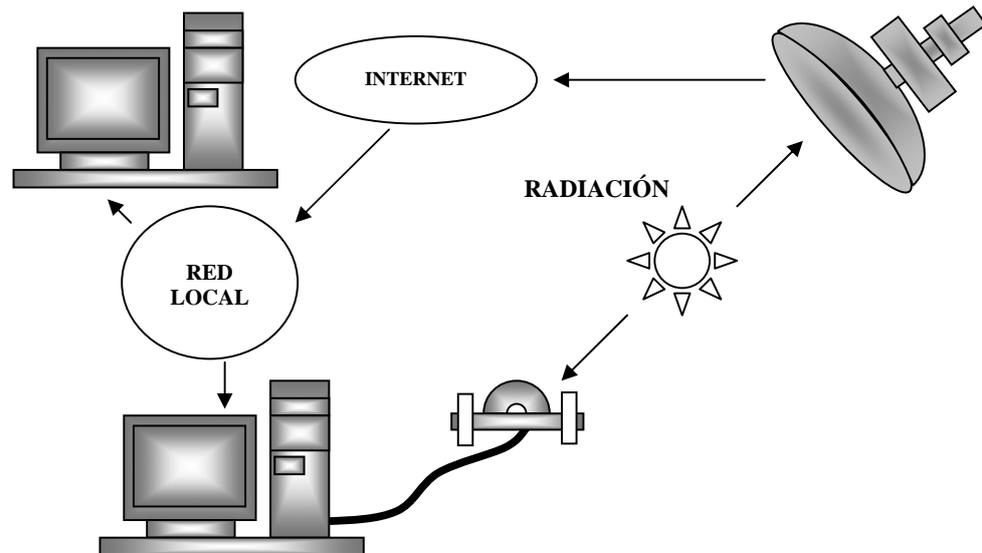


Figura 8. Ejemplo de diagrama de radiación solar por el método satelital, un sistema que permite obtener la irradiancia de suelo utilizando un modelo satelital GL1.0 el cual su estimación se basa en la radiación que recibe el satélite el cual contiene un sensor de radiación solar desarrollado en el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciales (INPE), Brasil (Bastos et al, 1996).

A pesar de las grandes ventajas que presenta la estimación de la irradiancia solar a partir de información satelital, no se debe menospreciar la importancia de una red terrestre que provea información de un número grande de puntos bien distribuidos sobre un territorio dado. Para que los métodos satelitales den resultados razonables, es necesario calibrarlos con datos de superficie, lo cual requiere de una buena cobertura de una red terrestre constituida por estaciones situadas estratégicamente^[11].

2.3 Estimación con base en Atlas de radiación

Diferentes investigadores han publicado varios mapas y tablas de radiación solar para México. Al ser relativamente escasos los datos medidos en tierra que han estado disponibles para la elaboración de estos mapas y tablas, todos ellos se basan en métodos estimativos de diferentes tipos. Como se ha discutido anteriormente, cada metodología tiene sus propias limitaciones (Claudio A. et al, 2005). En las figuras 9, 10 y 11 se muestran ejemplos de este tipo de mapas.

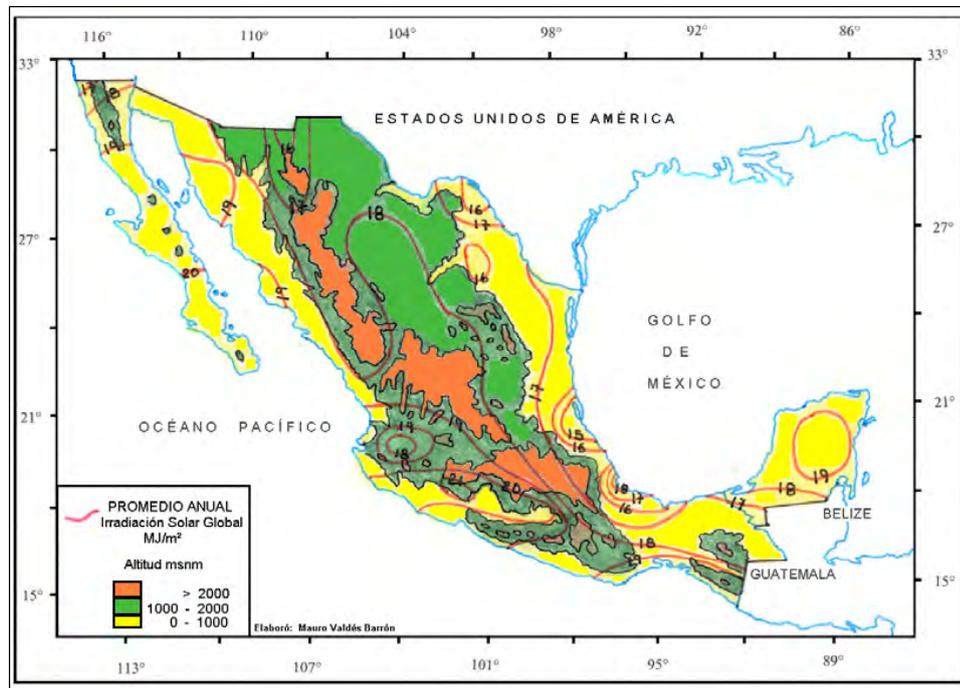


Figura 9. Isolneas de insolución promedio anual para México, en MJ/m²/día; adaptado de (Galindo y Valdés, 1992).

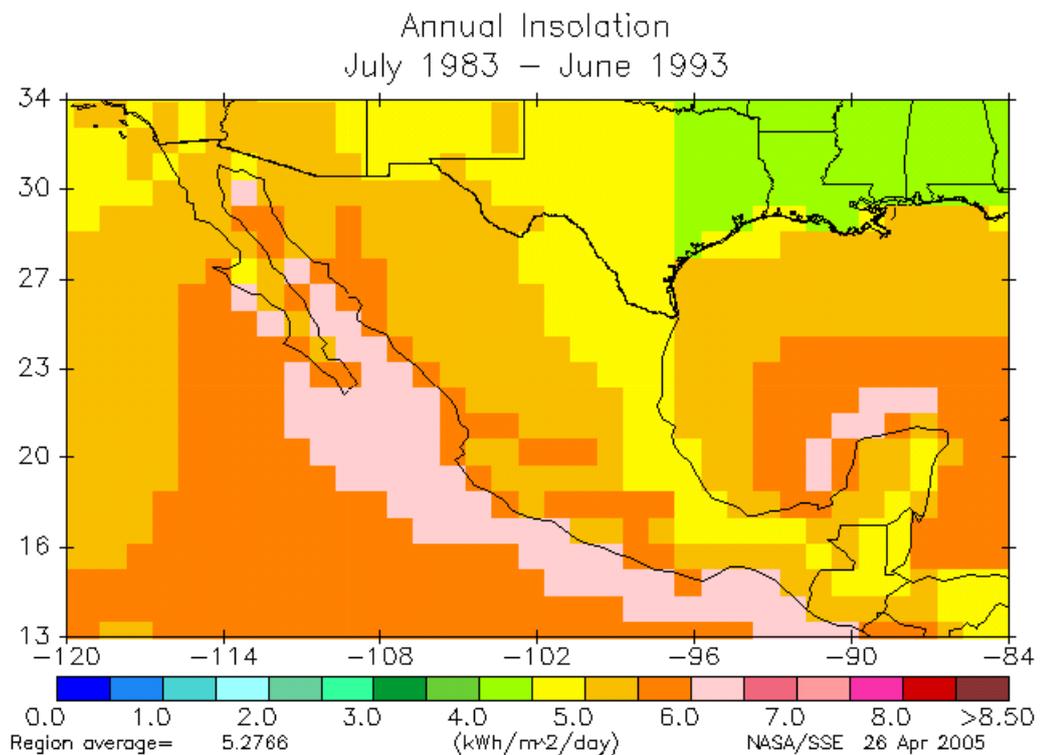


Figura 10. Mapa de insolución anual obtenido a partir del modelo de la NASA (NASA, 2005).

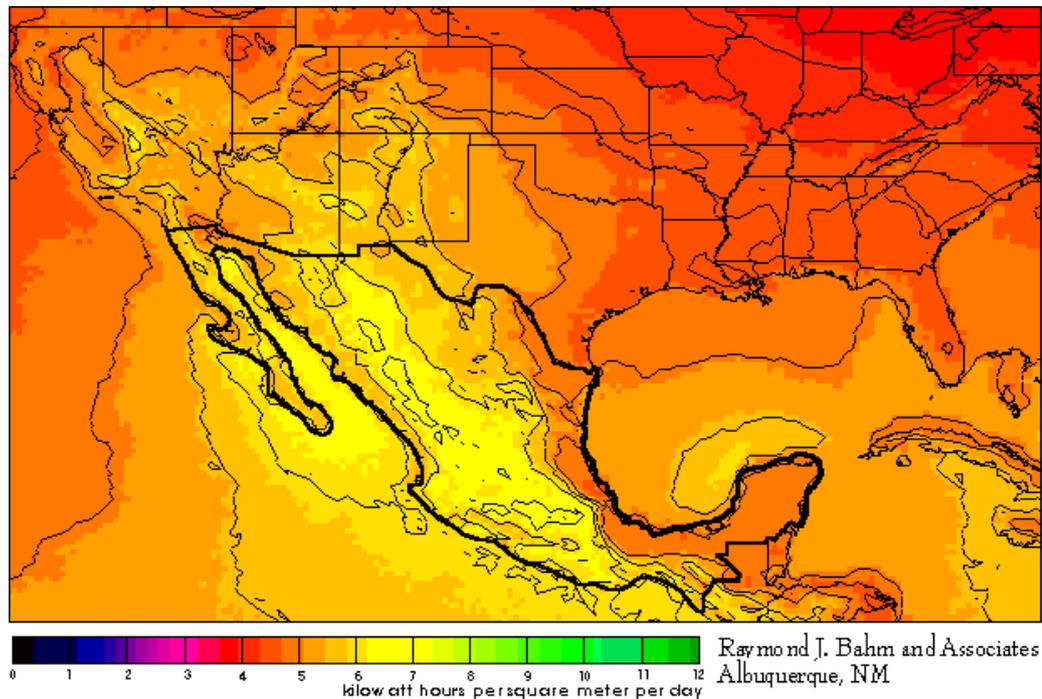


Figura 11. Mapa de radiación solar obtenido a partir del modelo de la NASA (NASA, 2005).

El potencial que tiene este método para abarcar grandes extensiones geográficas con buena resolución es algo que no tiene ningún otro método en la actualidad. Sin embargo, los satélites por sí mismos no pueden proveer una evaluación del recurso, debido a que miden parámetros que no se relacionan de manera simple con la irradiancia de la radiación global solar.

2.4 Medición directa de la radiación solar

Existen distintos instrumentos para medir la radiación solar. Estos instrumentos tienen algún tipo de sensor, los cuales hay de diferentes clases, entre los principales están:

Sensores calorimétricos. En estos sensores la energía solar incidente se transforma en calor, produciéndose un aumento de la temperatura del sensor o de un fluido en circulación. El aumento de la temperatura es una medida de la potencia solar recibida por él.

Sensores termomecánicos. El sensor está constituido por una cinta bimetálica. Al incidir la radiación solar sobre una de las cintas, la energía absorbida produce un aumento de su temperatura y con ello un aumento de su deformación, deformándose. La deformación es una medida de la potencia solar incidente.



Sensores termoelectrónicos. Estos consisten de dos alambres metálicos (termopar) de diferentes materiales, cuyos extremos (puntas) se mantienen a diferentes temperaturas, produciéndose una FEM (fuerza electromotriz inducida), este fenómeno se conoce como el efecto Seebeck (figura 12). La intensidad de la FEM depende de los materiales empleados y de la diferencia de temperaturas. La intensidad de la FEM es una medida de la potencia solar incidente. En los instrumentos de medición, la punta caliente se expone a la radiación solar mientras que la fría se oculta de ella.

El efecto mencionado tiene lugar por el hecho de que la densidad de portadores de carga (o electrones en los metales) es diferente de un conductor a otro y depende de su temperatura: en un termopar cuyas puntas se mantienen a diferentes temperaturas, ocurre una difusión de cargas a diferente razón en cada punta: el efecto neto es la aparición de una corriente eléctrica en el circuito, provocado por un gradiente de temperatura y no por un campo electrostático; esta fuerza electromotriz térmica depende de la temperatura de una punta, si la otra se mantiene a temperatura constante. Se puede demostrar que las variaciones de la fuerza electromotriz térmica de un termopar respecto de las variaciones de temperatura de una de las puntas no dependen de la temperatura de la otra punta, es decir, solo depende de la diferencia de sus temperaturas.

Una termopila es un conjunto de termopares conectados en serie de tal manera que la fuerza electromotriz total sea la suma de las fuerzas electromotrices de sus elementos. El arreglo de los termopares se realiza de tal forma que se configuran áreas de "puntas frías" (por ejemplo a temperatura ambiente) y áreas de "puntas caliente" (por ejemplo calentadas por radiación solar), esto se aprecia en la figura 13.

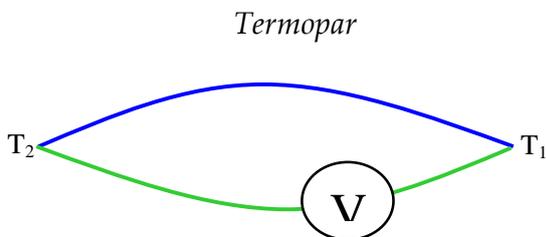


Figura 12. Voltaje de Seebeck.

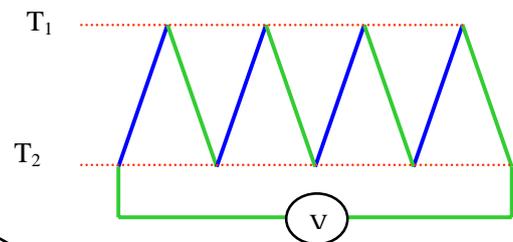


Figura 13. Termopila.

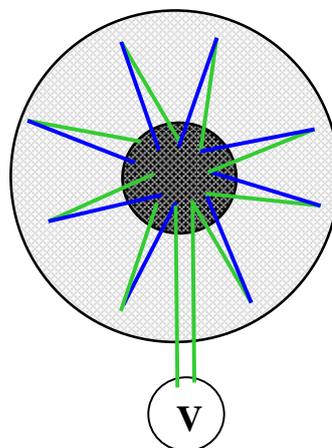


Figura 14. Termopila en estrella para piranómetro.



Los sensores termoelectricos para la medición de la radiación solar usan termopilas, en las que el área de las “puntas calientes” la constituye un sumidero de calor altamente eficiente, el cual se obtiene recubriendo esta área con un material negro de gran absorptancia, lo más próximo posible al 100% (figura 14). Por otro lado, el área de “puntas frías” se recubre con el material altamente reflejante o bien se adecua un sumidero de calor que permita que la temperatura de esta área, en un buen contacto térmico con el, no se altere apreciablemente por la radiación incidente.

El área de “puntas calientes” es la que constituye realmente el sensor de radiación y es por esta razón, que además de ser altamente absorbente, debe ser no selectivo de la radiación de diferentes longitudes de onda, es decir, que su absorptancia espectral sea constante para todas las radiaciones de longitudes de onda del espectro visible (de 0.3 μm a 4.0 μm) y sea lo más próximo al 100%

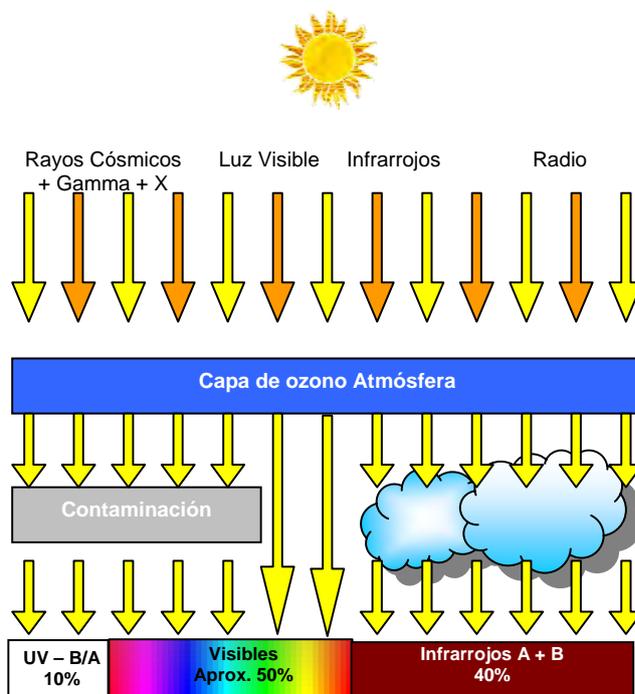


Figura 15. El espectro solar

La luz solar se compone de un espectro de varias longitudes de onda, visibles e invisibles, que se extienden de 0.280 a 0.3000 μm . La radiación emitida por el sol es absorbida parcialmente por la capa de ozono, las nubes y la contaminación atmosférica.

Si bien los sensores termoelectricos como los que se han descrito anteriormente, son hasta la fecha los mejores instrumentos para medir los flujos de energía de radiación solar, éstos deben calibrarse respecto de instrumentos que por sus características físicas de diseño sean capaces de medir en forma absoluta estos flujos con alto grado de exactitud de tal manera que se les pueda considerar instrumentos estándares de referencia.

Sensores fotovoltaicos. En años recientes se han estado utilizando sensores del tipo fotovoltaico (fotodiodo de silicio) los cuales por sus características físicas han resultado ser unos buenos simuladores de piranómetro. Las comparaciones contra piranómetros de primera clase a los que se han sometido bajo diferentes condiciones de cielo (despejados, nublados, etc.) dan como resultado un alto grado de correlación estadística, lo cual permite decir que las mediciones tienen una precisión dentro de un $\pm 2\%$ en días despejados y hasta un $\pm 5\%$ en días nublados; Además, estos sensores tienen una constante de tiempo de aproximadamente 10 μs , característica física que se ha aprovechado para construir los llamados “Piranómetros con banda rotatoria”, dispositivos que permiten medir casi simultáneamente la radiación global y la radiación difusa, a partir de lo cual es posible calcular la radiación directa.



2.5 Instrumentos de medición de la radiación solar

Para fines de este trabajo solo se detallan: el piranómetro y el pirheliómetro, que son los instrumentos más comunes utilizados en las estaciones solarimétricas. Adicionalmente se presentan el heliógrafo y el actinógrafo.

2.5.1 Piranómetro



Figura 16. Piranómetro black & white, Eppley.

El piranómetro es el instrumento más común para medir la radiación solar (figura 16), se emplea para registrar la radiación solar total dentro de su campo de vista hemisférico. El aparato usualmente se coloca sobre una superficie horizontal con el fin de registrar la radiación global en un sitio dado. La señal eléctrica generada puede servir para obtener gráfica o digitalmente la radiación solar como función del tiempo, o bien, procesada en un integrador electrónico, puede servir además para obtener el total de la energía incidente en un periodo de tiempo dado (cada hora ó cada día).

Componentes de un Piranómetro (figura 17):

- Domo de vidrio o cuarzo
- Sensor
- Cable
- Tornillos de balanceo
- Nivel
- Desecador
- Base y sumidero de calor

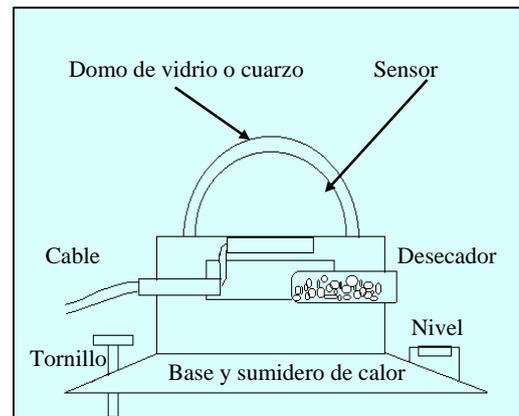


Figura 17. Componentes de un piranómetro.



El piranómetro puede modificarse para que mida únicamente radiación difusa, empleando una banda metálica que obstruya la radiación directa del sensor (como se aprecia en la figura 18).

Figura 18. Piranómetro con banda sombreadora.



2.5.2 Pirheliómetro

Un segundo instrumento también muy común es el pirheliómetro (figura 19), que sirve para medir la radiación solar directa normal. Los datos obtenidos del pirheliómetro deben interpretarse cuidadosamente en el diseño de concentradores solares de enfoque que permiten alcanzar altas temperaturas de operación. En la figura 20 se muestran los principales componentes de un pirheliómetro y en la figura 21 un diagrama de medición de la radiación solar.



Figura 19. Diferentes accesorios del pirheliómetro, receptor de señal, adquisidor de datos y filtros solares respectivamente.

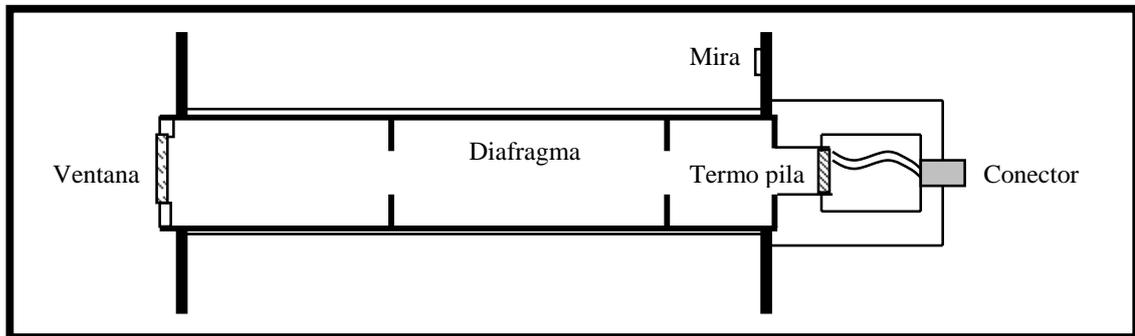


Figura 20. Diagrama de los componentes de un pirheliómetro.

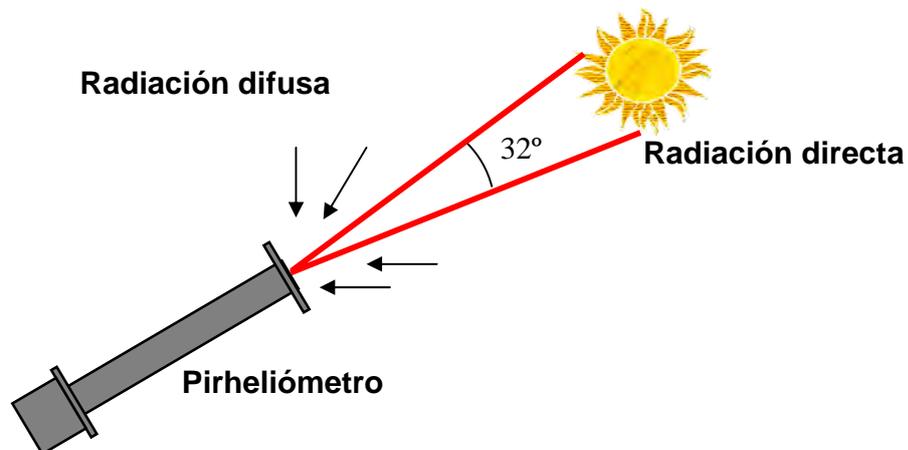


Figura 21. Diagrama de medición de la radiación solar directa con un pirheliómetro.



2.5.3 Heliógrafo

Un tercer instrumento, muy antiguo, es el que se conoce como heliógrafo de Campell-Stokes para medir las horas de soleamiento en un lugar (Figura 22). El instrumento está constituido por una lente esférica que produce una imagen del Sol sobre papel tratado químicamente. El papel se quema cuando el calor de la radiación está por encima de 120 W/m^2 . La longitud del papel quemado es un índice del número de horas de Sol brillante. Debe apuntarse que el heliógrafo de Campell-Stokes no mide la energía solar: solamente proporciona los intervalos de tiempo en el día en que la radiación está por encima de un mínimo establecido.



Figuras 22. Distintos modelos de heliógrafos de Campell-Stokes.

2.5.4 Actinógrafo o Piranógrafos

Algunos otros piranómetros, conocidos también como piranógrafos mecánicos (figura 23), se basan en la dilatación diferencial de elementos bimetalicos expuestos a la radiación solar. Mediante un mecanismo apropiado, un trazador registra la radiación solar sobre el papel que se monta en un tambor cilíndrico. El movimiento de este tambor se efectúa mediante un mecanismo de reloj con cuerda periódica. Su precisión se encuentra entre un 15 a 20% y es considerado un instrumento de tercera clase.



Figura 23. Actinógrafo.



2.6 Características de los instrumentos de medición

En esta sección se muestra un resumen de la clasificación y principales características de los Piranómetros y Pirheliómetros:

a) Piranómetros tipo estándar secundario



b) Piranómetros de primera clase



c) Piranómetros de segunda clase



d) Piranómetros de tercera clase



e) Pirheliómetros estándar primario, 1º clase y 2º clase





Característica	A $\frac{mW}{cm^2}$	B %	C %	D %	E %	F %	G Seg. (max)
Pirheliómetro							
Estándar primario	± 0.2	-----	± 0.5	± 0.2	± 1	± 0.2	25
Pirheliómetros							
1º clase	± 0.4	-----	± 1	± 1	± 1	± 1	25
2º clase	± 0.5	-----	± 2	± 2	± 2	± 2	60
Piranómetros							
1º clase	± 0.1	± 3	± 1	± 1	± 1	± 1	25
2º clase	± 0.5	$\pm 5-7$	± 2	± 2	± 2	± 2	60
3º clase	± 1.0	± 10	± 3	± 5	± 5	± 5	240

En donde las características enumeradas de la A hasta la G son las siguientes:

A. Constante de calibración, también llamada sensibilidad:

Es la relación que existe entre la radiación recibida por el instrumento y la señal eléctrica producida por el sensor, (se expresa en $\mu V/W/m^2$).

B. Respuesta angular o geométrica:

Definida como la variación de la sensibilidad del instrumento con la dirección de la radiación incidente.

C. Linealidad:

Es la constancia de la razón de cambio de la señal de salida respecto del cambio en la radiación incidente, lo cual se manifiesta en el hecho de que la sensibilidad sea constante para todo el rango de valores de radiación incidente.

D. Estabilidad:

Es la constancia de alguna de las características instrumentales con respecto a las variaciones de algún otro parámetro. Usualmente esta característica es la sensibilidad y su estabilidad es respecto al tiempo o edad del instrumento.

E. Respuesta espectral:

Es la sensibilidad del instrumento a la radiación de diferentes longitudes de onda, o bien es la variación de la constante de la calibración en función de la radiación de diferentes longitudes de onda.

F. Estabilidad por cambios en la temperatura:

Es la variación de la sensibilidad y otras características del instrumento debidas a los cambios en la temperatura ambiente del instrumento.

G. Respuesta dinámica o constante de tiempo:

Es el tiempo necesario para que la señal de salida sea el 1/e de su valor al cambiar bruscamente la radiación incidente.



CAPÍTULO III MONTAJE E INSTALACIÓN

Este capítulo se enfoca al objetivo principal, el cual es el montaje de la estación solarimétrica. Está estructurado de la siguiente manera: en la primera parte se menciona el sitio en donde estará instalada. Posteriormente se presentan los diseño y el proceso de construcción de las bases de los piranómetros, incluyendo la descripción de los materiales. Seguidamente se mencionan las características de los piranómetros, así como el sistema de adquisición de datos seleccionado y por último el montaje de la estación.

A continuación se describe el proceso de montaje de la Estación Solarimétrica de la Universidad de Quintana Roo. La metodología empleada consiste en:

1. Recabar información acerca del estado del arte del tema (capítulos I y II).
2. Seleccionar el sitio de colocación de la estación solarimétrica.
3. Diseñar y construcción de las bases de los piranómetros.
4. Seleccionar los piranómetros y sistema de adquisición de datos.
5. Armar de la estación solarimétrica.

3.1 Selección del sitio para la Estación Solarimétrica.

El sitio seleccionado para instalar la Estación Solarimétrica fue la azotea del taller de ingenierías (ver figura 24). Cabe mencionar que originalmente se había seleccionado el parque de energías renovables de la Universidad, pero debido a que no se cuenta con la protección necesaria (seguridad de los equipos) se decidió cambiar de sitio.



Figura 24. Sitio seleccionado en la azotea del taller de ingenierías.

El sitio seleccionado es un espacio despejado, amplio (6 x 5 m² aprox.), libre de obstáculos y sobretodo la estación no está expuesta a personas ajenas o gente curiosa.



3.2 Diseño y construcción de las bases de los piranómetros.

Se diseñaron y construyeron dos bases para los piranómetros: una para el piranómetro que registre radiación solar global y otra para el piranómetro que registre la radiación solar difusa. Para fines prácticos se denominarán *Base 1* y *Base 2* respectivamente. En las figuras 25 y 26 se muestran los diseños de las mismas, indicando sus principales componentes.

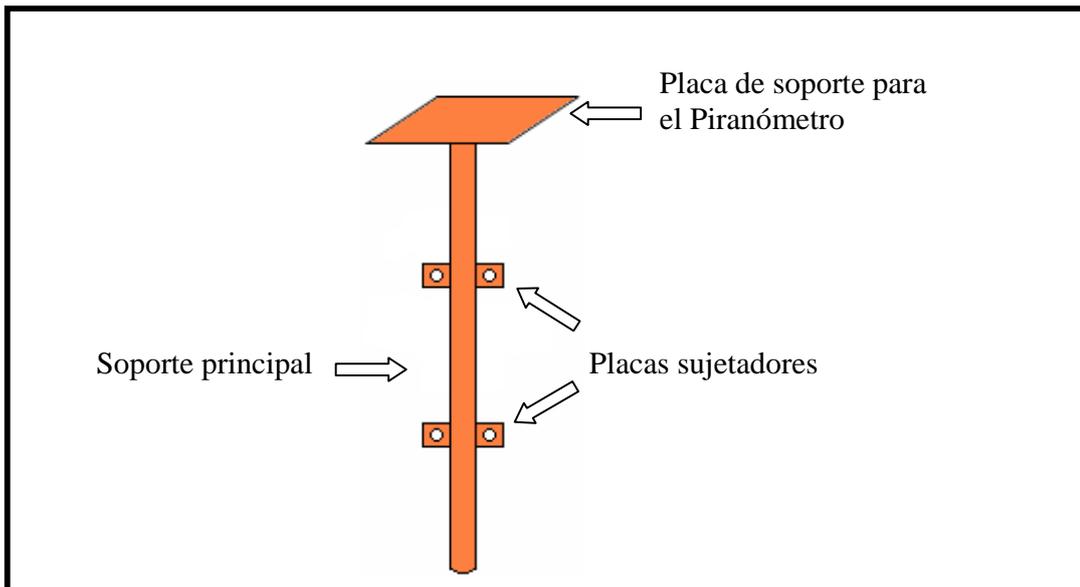


Figura 25. Diseño y características de la Base 1.

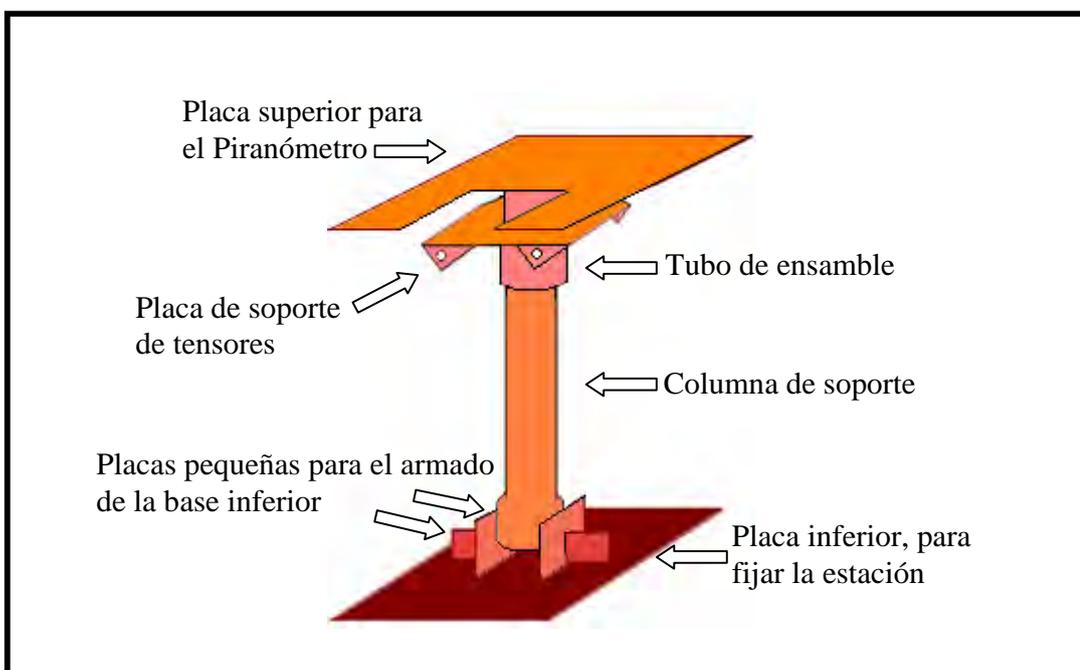


Figura 26. Diseño y características de la Base 2.



Con los diseños propuestos de las bases, se procedió a la construcción de las mismas. A continuación se mostraran los pasos que se siguieron.

3.2.1 Construcción de la Base 1

-Base 1. Es la que soportará solamente un piranómetro (radiación solar global). Está conformada de cuatro piezas. Dos de metal de acero de $4 \times 15 \text{ cm}^2$ con un espesor de 5 mm y con dos barrenos de 2 cm de diámetro en sus extremos; una de $12 \times 12 \text{ cm}^2$, con el mismo espesor y una columna de PTR cuadrada ($4 \times 4 \text{ cm}^2$) de un metro de longitud (como se observa en la figura 27a). Su diseño es muy simple y estará colocada (empotrada) en la pared. En la figura 27b se muestra la base 1 armada.

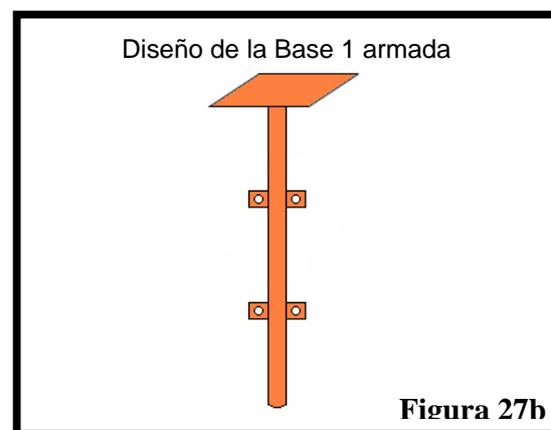
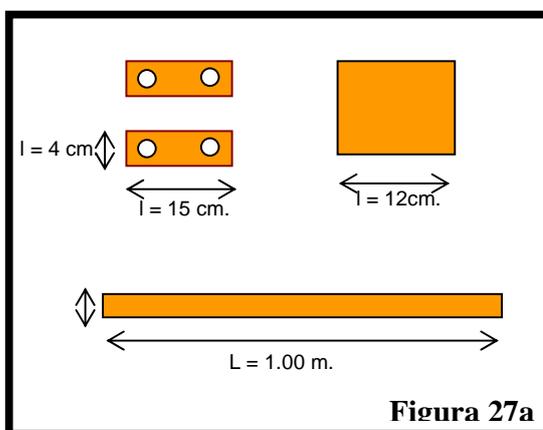


Figura 27. Características y dimensiones de cada una de las cuatro piezas de la Base 1.

De la figura 28 a la 35, se presentan algunas fotografías de la construcción de la Base 1. Los pasos que se siguieron en la construcción del proceso son: se cortó el PTR cuadrado de 4 cm de lado a la longitud de un metro, enseguida se soldó esta pieza (que se denomina columna de soporte) a la placa que sostendrá el piranómetro, posteriormente se soldaron las dos placas pequeñas (que tendrán la función de detención en la pared, es decir una especie de abrazaderas) y por último se aplicaron tres capas de minio de plomo (pintura anticorrosiva).



Figura 28. Sujetadores de acero.



Figura 29. Tubo PTR galvanizado.



Figura 30. Tabla pequeña de acero par al base del piranómetro.



Figura 31. Proceso de soldadura de la columna con la placa.



Figura 32. Soldadura de la primera placa sujetadora.



Figura 33. Soldadura de la segunda placa sujetadora.



Figura 34. Finalmente que soldada de la Base 1 completamente.



Figura 35. Aplicación de minio de plomo (pintura anticorrosiva).



3.2.2 Construcción de la Base 2

Base 2. Es la que soportará al piranómetro con su respectiva banda sombreadora (radiación solar difusa). Con base a los componentes mostrados en la figura 26. A continuación se detalla el proceso de construcción:

A) PARTE INFERIOR

Para la construcción de la parte inferior de la Base 2, se contemplaron cinco piezas de metal de acero con un espesor de 5mm (figura 36); la mayor de 40 x 40 cm², será la que este en contacto con el piso de la azotea, dos piezas de 12 x 12 cm² servirán para un manejo fácil de la columna de soporte y por último dos piezas de 12 x 8 cm² que funcionaran como unión (con soldadura) de las cinco piezas de esta parte (como se observa en la figura 36b).

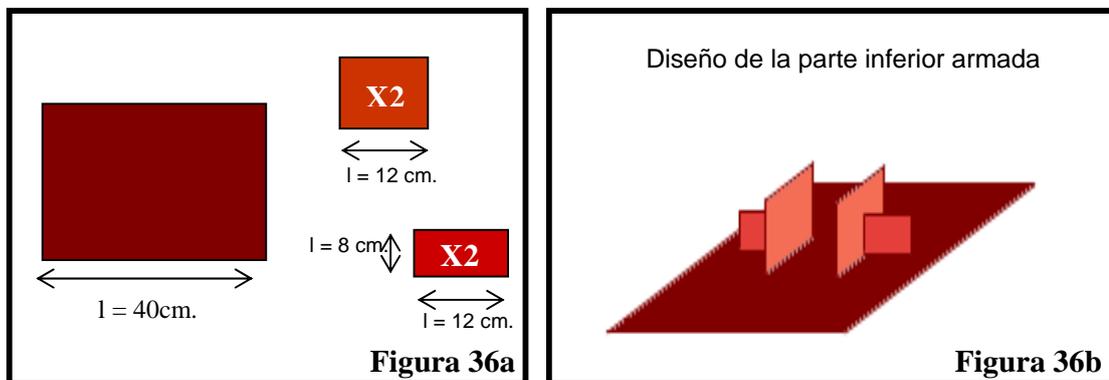


Figura 36. EL panel a) muestra las dimensiones de cada una de las cinco piezas. El panel B)muestra la imagen de la parte inferior ensamblada.



Figura 37. Corte de la placa de acero.



Figura 38. Soldadura de las cinco piezas.

En las figuras 37 y 38 se muestra el proceso de construcción de la parte inferior de la Base 2, iniciando por el corte en la placa de acero de las cinco piezas (figura 36a). El corte se realizó con un esmeril y discos de metal. Posteriormente se soldaron las piezas (figura 38), al terminar se le aplicaron tres capas de minio de plomo (pintura anticorrosiva).



B) COLUMNA DE SOPORTE

Para la columna de soporte se utilizó un tubo de metal con un diámetro de 12 cm en uno de sus extremos y el otro con un diámetro menor; de 11.5 cm, un espesor de 5 mm y una longitud de 1.50 m (figura 39).

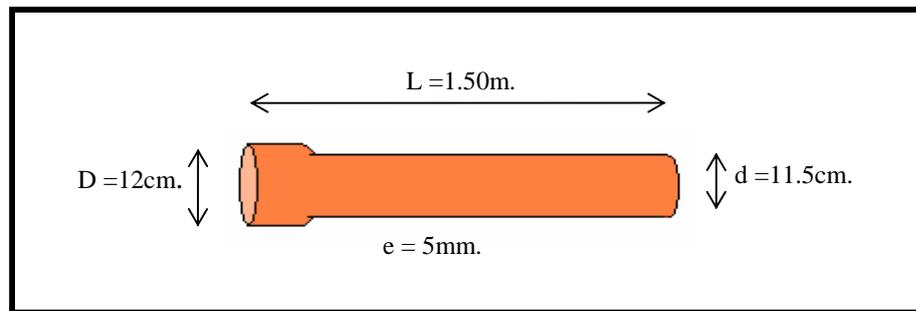


Figura 39. Características y dimensiones de la columna de soporte.

De las figuras 40 a la 42 se muestra el proceso de construcción de la columna de soporte. Primero se cortó el tubo metálico a las dimensiones ya mencionadas con un disco de metal para esmeril (figura 38). Cabe mencionar que se seleccionó este tubo con dos diámetros diferentes, con el fin de que en uno de sus extremos (el de mayor diámetro) el ensamble de las otras dos piezas de la Base fuera más fácil. Por último se aplicó tres capas de minio de plomo.



Figura 40. Corte de la columna.



Figura 41. Corte de la columna.



Figura 42. Aplicación de minio de plomo.



C) PARTE SUPERIOR

De las tres partes que conforman a la Base 2, la parte superior es la más elaborada, debido a que ésta se acoplará tanto a la banda sombreadora (que a su vez soporta al Piranómetro) como a la columna de soporte. Los elementos que componen esta parte son: una placa de 40 x 40 cm² con un corte cuadrado en uno de sus lados de 12 x 12 cm², una placa más de 16 x 16 cm² con un corte circular en su centro de 12 cm de diámetro y en cada punta se barrenó con un diámetro de 2 cm las cuales de le dieron un doblé para colocar los tensores, por último se cortó un pequeño tubo de 26 cm de longitud con un diámetro mayor de 12 cm. en uno de sus extremos y el otro con un diámetro menor de 11.5 cm (ver figura 43). Adicionalmente en esta parte estará el sistema de tensores de la base.

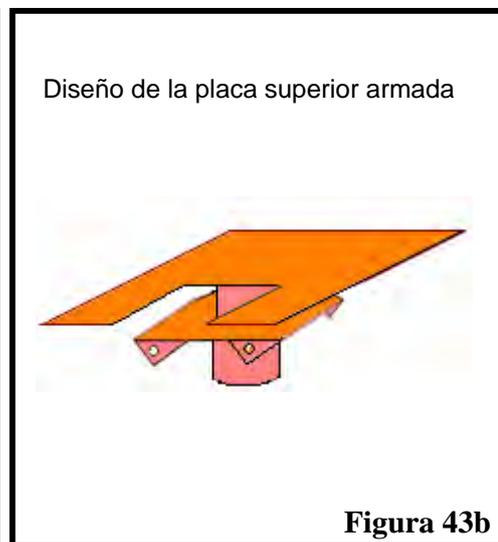
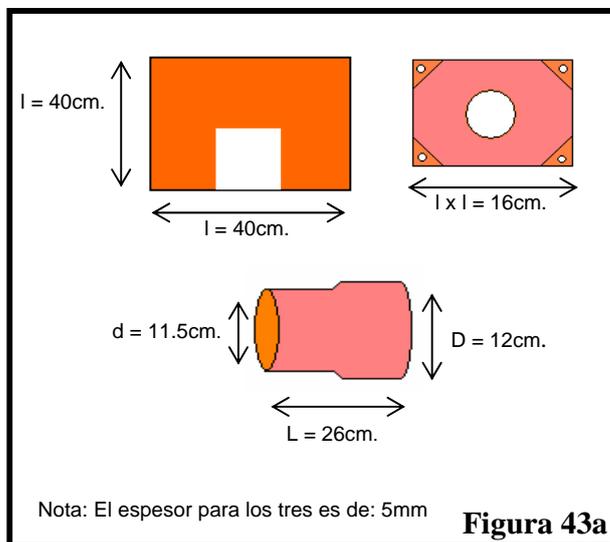


Figura 43. Dimensiones y características de cada una de las 3 piezas de la parte superior.

De las figuras 44 a la 50 se muestran algunas fotografías del proceso que se siguió para la construcción de esta parte. Inicialmente se colocó en el tubo la placa de tensores (cabe mencionar que en esta placa ya se habían colocado los guardacabos y el cable de tensado), posteriormente se soldó la placa de soporte (figura 48). Finalmente se aplicaron tres capas de minio de plomo.



Figura 44. Ensamble de la placa de tensores.



Figura 45. Ajuste del tubo con la tabla de tensores y su base.

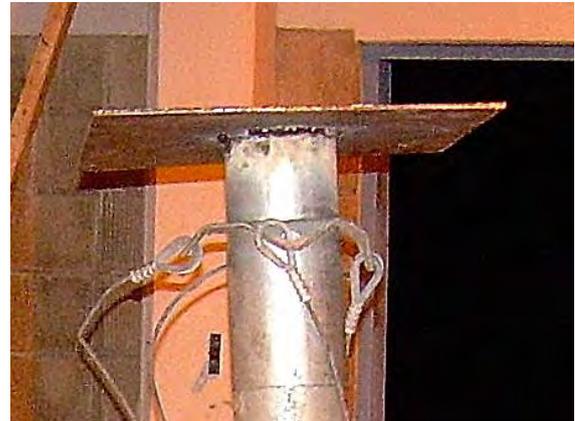


Figura 46. Muestra de ensamble de la Base 2.



Figura 47. Preparación de soldadura para las tres piezas.



Figura 48. Soldadura de las tres piezas.



Figura 49. Aplicación de minio de plomo.



Figura 50. Rollo de tensor para sujetar la Base 2.



3.2.3 Ensamble de las Bases

En el caso de la Base 1 no es necesario ensamblarla, ya que se soldaron todos sus componentes. Pero, para la Base 2, una vez construidas todas sus partes que la conforman se dispuso a armarla (figura 54).

Primero en la *Parte Inferior* se taladraron tanto las placas de 12 x 12 cm², como la *Columna de Soporte*, para colocar un tornillo de ½ pulgada de diámetro y 20 cm de largo, con el fin de acoplar estas partes, como se ve en la figura 51. Posteriormente se colocó la *Parte Superior* en la columna de soporte (figura 54), y por último se colocaron los guardacabos que sujetaran a los tensores (figura 52 y 53), con el fin de darle estabilidad y firmeza.

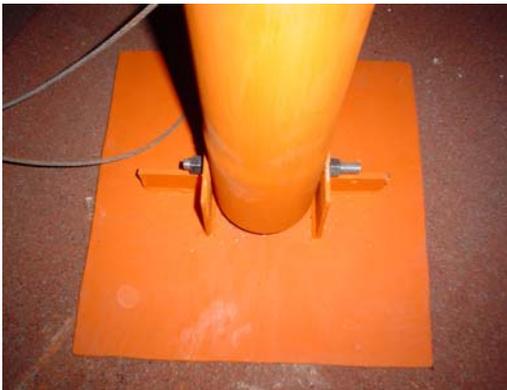


Figura 51. Colocación del tornillo de ½".



Figura 52. Ajuste de la placa de tensores al colocar la Base 2.



Figura 53. Ajuste de tensores en la pared con guarda cabos.

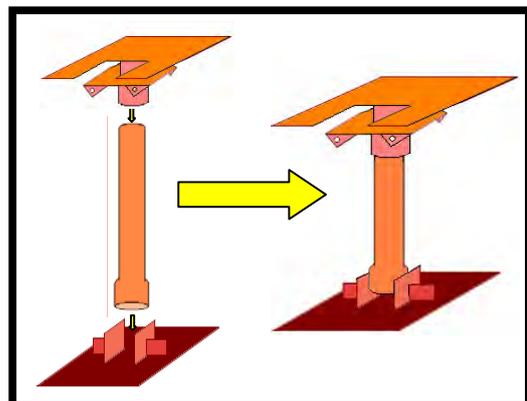


Figura 54. Imagen del ensamble de las tres partes de la Base 2.



3.3 Piranómetros y sistema de adquisición de datos.

3.3.1 Piranómetros:

Como se mencionó en el capítulo I, la Universidad de Quintana Roo cuenta con dos piranómetros Eppley modelo 8-48 (instrumentos de primera clase), uno de ellos tiene su banda sombreadora. En el capítulo dos se describió el principio de funcionamiento, así como sus componentes principales. En las figuras 55 y 56 se muestran fotografías de estos equipos.



Figuras 55. Piranómetro Eppley 8-48, vista lateral panel izquierdo. Vista superior panel derecho.



Figuras 56. Piranómetro Eppley 8-48 con banda sombreadora.



Las especificaciones más importantes de los piranómetro utilizados son:

- Sensibilidad: 11 microvolts por cada W/m^2 (aproximadamente)
- Temperatura: constante del $\pm 1.5\%$ en un rango de $-20\text{ }^\circ\text{C}$ a $+40\text{ }^\circ\text{C}$
- Impedancia: 350 ohms
- Linealidad: el $\pm 1\%$ para 0 a $1400\text{ }W/m^2$
- Tiempo de respuesta: 5 segundos
- Tamaño: diámetro de 13 cm. aprox. y 8.5 cm. de alto
- Peso: 900 gramos aproximadamente.

Este sistema de adquisición registrará las lecturas en milivolts de la radiación solar (global y difusa), posteriormente las convierte a W/m^2 de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$G_T = \frac{L_1}{K_1} \quad (1)$$

$$G_d = \frac{L_2}{K_2} \quad (2)$$

Donde L_1 y L_2 son las lecturas en milivolts (de los dos piranómetros), K_1 y K_2 son las constantes de los instrumentos ($9.88 \times 10^{-3}\text{ mV/Wm}^{-2}$ y $10.57 \times 10^{-3}\text{ mV/Wm}^{-2}$).



Figuras 57. Cable de conexión del piranómetro al adquisidor de datos.



3.3.2 Sistema de adquisición de datos.



Figura 58. Datalogger básico modelo CR510 de la Campbell Scientific Inc.

Para el registro y control de los datos obtenidos de los piranómetros se utiliza un sistema de adquisición de datos. Se realizó una búsqueda de información acerca de los equipos de adquisición, tanto en la bibliografía como con los usuarios de algunas estaciones solarimétricas del País. Con base en esta información se seleccionó el Datalogger básico modelo CR510 de la Campbell Scientific Inc (ver figura 58) Este sistema ha demostrado una excelente capacidad para el manejo y control de los datos, el manejo es muy simple y tiene la ventaja de tener una alimentación eléctrica a base de energía solar (modulo fotovoltaico), lo que le da una total independencia.



Los principales componentes y accesorios para el sistema adquirente de datos CR510 son: panel fotovoltaico de 10 watts, adquirente de datos CR510, batería interna para suministro de energía, caja de protección contra el medio ambiente entre otros. En las figuras 59 a la 63 se muestran las fotografías de estos componentes.

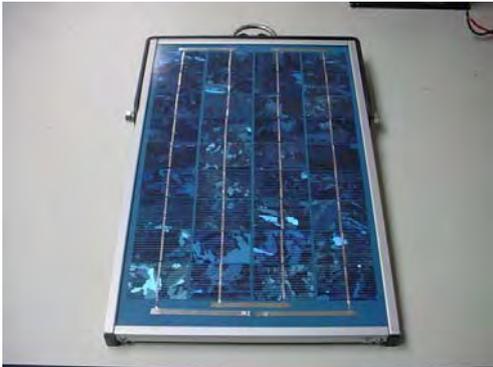


Figura 59. Módulo solar monocristalino de 10 W, es el encargado de suministrar energía a la batería del equipo.



Figura 60. Adquirente de datos marca Campbell Scientific Inc.



Figura 61. Suministro de energía de 12 V PS100.



Figura 62. Batería interna del PS100, la cual recibe toda la energía que manda el módulo solar y la almacena.



Figura 63. Caja protectora contra el medio ambiente PLV100, con desecador de humedad.



El armado de los diferentes componentes del sistema de adquisición de datos se realizó con base en las especificaciones de sus respectivos manuales de operación.

3.4 Armado de la estación solarimétrica

Ya con las bases instaladas y el sistema de adquisición de datos seleccionados, se procedió con el montaje de la estación Solarimétrica, que es el objetivo principal de este trabajo. Para lo cual se siguieron estos pasos:

1. Se colocó la banda sombreadora en la Base 2 (Figura 64).
2. Se colocaron los piranómetros en sus respectivas bases, teniendo precaución de que queden nivelados (Figura 65).
3. Se conectan los cables de los piranómetros: el extremo que tiene el conector se inserta en los piranómetros y el otro extremo al sistema de adquisición de datos (Figuras 66), fijándolos con cinchos plásticos.
4. Se arma el sistema de adquisición de datos, incluyendo el módulo fotovoltaico de alimentación, como se observa en la figura 67.



Figura 64. Colocación de la banda sombreadora antes de pintar la Base 2.



Figura 65. Nivelación de los piranómetros.



Figura 66. Instalación del adquisidor de datos en la Base 2.



Figura 67. Instalación del modulo fotovoltaico al adquisidor de datos.



De las figuras 68 a la 70 se muestran pruebas preliminares del correcto funcionamiento de la instalación para obtener de radiación solar de la estación solarimétrica.



Figura 68. Conexión del piranómetro al adquisidor de datos.

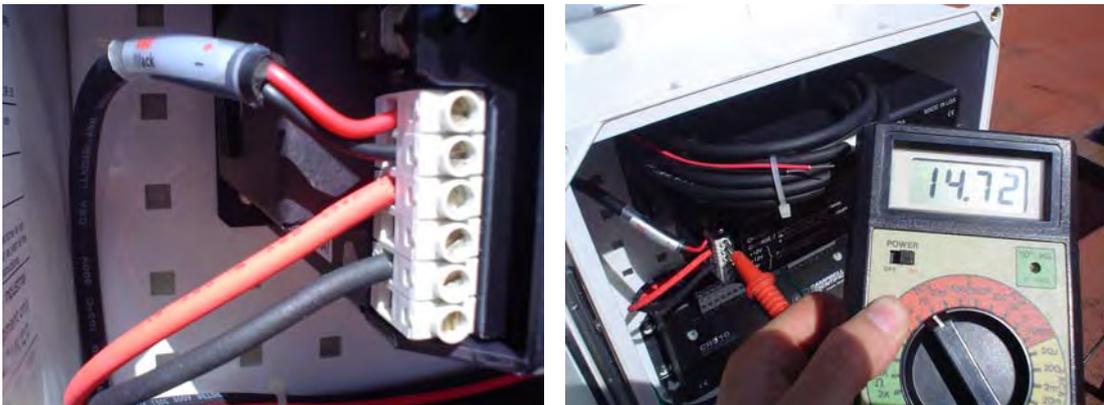


Figura 69. Conexión del modulo fotovoltaico a la batería.



Figura 70. Conexión de la batería hacia el adquisidor de datos.



Finalmente en las fotografías 71 y 72 se muestra la estación solarimétrica lista para operar.



Figura 71. Armado final de la estación Solarimétrica, radiación directa (BASE 1).



Figura 72. Armado final de la estación Solarimétrica, radiación difusa (BASE 2).



CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo monográfico y se describen de qué forma se cumplió tanto el objetivo principal y los particulares planteados al inicio. Finalmente se plantean algunas recomendaciones relacionadas al mantenimiento de la estación solarimétrica.

4.1 Conclusiones

Podemos mencionar que se diseñaron, se construyeron y se instalaron las dos bases que soportan a los piranómetros, Esto incluye la selección de materiales, así como su acondicionamiento contra el medioambiente (aplicación de pintura anticorrosiva). Con respecto al sitio de colocación de la estación podemos decir que el lugar adecuado es la azotea del Taller de Ingenierías, ya que este sitio ofrece seguridad a los equipos, así como condiciones adecuadas (no sombras ni obstáculos). Adicionalmente se cumplió con la selección e instalación del sistema de adquisición de datos.

Adicionalmente se requirió de mucha investigación acerca del tema solarimétrico, ya que no existe mucha información ni en libros o medios científicos donde se planteen metodologías para este tipo de sistemas, por lo cual puedo decir que este trabajo monográfico se encuentra rico en información en el área de solarimetría.

Se puede concluir que se cumplió satisfactoriamente con el principal objetivo de este trabajo monográfico, que fue el montaje de la estación solarimétrica de la Universidad de Quintana Roo. Asimismo podemos decir que la estación solarimétrica se puso en operación, por lo que se espera que tan pronto se tengan bases de datos con la información solarimétrica de la Ciudad de Chetumal, éstos sirvan como base para el diseño de proyectos relacionados con la energía solar.

Por último y no menos importante se puede comentar que la Universidad de Quintana Roo estaría en condiciones de integrarse a la red nacional de Universidades y centros de investigación que cuentan con estaciones solarimétricas.

4.2 Recomendaciones

Para asegurar la calidad de los datos obtenidos es necesario contar con un programa de mantenimiento de la Estación Solarimétrica. Por lo que se deben realizar las siguientes acciones:

- Para ayudar a que los piranómetros midan correctamente, es necesario realizar la limpieza de los domos de cuarzo. Esta limpieza debe realizarse diariamente usando agua limpia (de preferencia agua destilada) procediendo a secar con un lienzo de



tela suave que no deje pelusa. También es necesario cambiar regularmente (cada seis meses aproximadamente) el desecador del interior del cuerpo del aparato cuando este se satura adquiriendo un color rosa muy claro.

- Se debe limpiar el modulo fotovoltaico cada 15 días, con el fin de asegurar que este en condiciones optimas de operación.
- Ajustar de la banda sombreadora cada semana.
- Verificar periódicamente el nivel de los piranómetros.
- Verificar semestralmente los tensores.
- Procurar el mantenimiento general una vez al año.
- Calibrar anualmente al menos un piranómetro. Esta calibración se deberá realizar en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM que es el Centro Regional de Radiación AR-IV, de la Organización Meteorológica Mundial.



ANEXOS

Anexo A-1: Descripción del sistema, aplicaciones y especificaciones del Adquisidor de datos CR510.

Anexo A-2: Sección 14. Instalación y mantenimiento del equipo.

Anexo A-1: Descripción, aplicaciones y especificaciones del Adquisidor de datos CR510.

Anexo A-2: Sección 14. Instalación y mantenimiento del equipo.