



**Centro de Investigación en Materiales**

**Avanzados S.C.**

**Maestría en Energías Renovables**

**Área Solar - Fotovoltaica**

**“Diseño y Construcción de un Prototipo Didáctico  
de Seguidor Solar Híbrido: Fotovoltaico-Térmico”**

Tesis que como Requisito para obtener el grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGIAS RENOVABLES**

PRESENTA:

**JUAN PEDRO CERVANTES DE LA ROSA**

**Director de tesis: Dra. Hilda Esperanza Esparza Ponce**

**Chihuahua, Chi. Agosto de 2015**

## **Agradecimientos**

A Dios por permitirme llevar una vida plena y me ha dado la perseverancia para finalizar esta Maestría.

A la memoria de mis padres por el amor y apoyo incondicional.

A mi esposa Beatriz por ser gran parte de mi vida, por apoyarme y estar siempre conmigo dando la fortaleza y felicidad a mi vida.

A la Dra. Hilda Esperanza Esparza Ponce, por alentarme a culminar la maestría y el gran apoyo y en especial le agradezco por ser un excelente maestra y por su comprensión gracias.

A mis amigos Miguel, José Luis, Hugo por el apoyo que me brindaron para terminar este prototipo.

# Contenido

CAPÍTULO I .....	8
INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Energía solar .....	8
1.2 Justificación .....	11
1.3 Objetivo general .....	12
1.4 Objetivos específicos .....	12
CAPÍTULO II .....	13
MARCO TEÓRICO .....	13
2.1 Seguidores solares .....	13
2.2 Funcionamiento de seguidores solares .....	13
2.3 Ventajas y desventajas de ambos tipos de seguidores .....	16
2.4 Tipos de Controles .....	16
2.5 Paneles fotovoltaicos .....	17
2.6 Carta solar .....	19
2.7 Latitud .....	21
2.7.1 Meridiano .....	22
2.8 Longitud .....	23
2.8.1 Ecuador .....	23
2.8.2 Trópico .....	24
2.9 Declinación .....	24
2.10 Perihelio .....	25
2.10.1 Afelio .....	26
2.11 Equinoccio .....	26
2.11.1 Cenit o cénit .....	27
2.11.2 Nadir .....	27
2.11.3 Esfera Terrestre .....	27
2.11.4 Solsticio .....	28
2.12 Ecuación del tiempo .....	28
2.13 Angulo horario $\omega$ .....	29
2.14 Altura $\alpha$ y Azimut Solar $\gamma$ .....	30

Capítulo III .....	31
SISTEMAS DE CAPTACIÓN .....	31
3.1 Colectores planos .....	32
3.2 Montaje de los colectores .....	51
3.3 Balance de energía en un colector solar plano .....	52
CAPÍTULO IV .....	65
SISTEMA DE CONTROL .....	65
4.1 Motor de corriente directa .....	65
4.2 Microcontrolador Arduino .....	68
4.3 Potenciómetro .....	69
4.4 Controlador PID.....	69
CAPÍTULO V .....	74
DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	74
5.1 Calentador solar plano .....	74
5.2 Mejora de calentador solar .....	74
5.3 Construcción del calentador solar plano.....	85
5.3.1 Especificaciones .....	87
5.4 Balance térmico del calentador plano .....	89
5.5 Celda Fotovoltaica .....	98
CAPÍTULO VI .....	102
DISEÑO MÉCANICO .....	102
6.1 Parte mecánica .....	102
CAPÍTULO VII .....	106
RESULTADOS .....	106
CONCLUSIONES .....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS .....	117

## Índice de Figuras

Figura 1. 1. Radiación solar anual que llega a la superficie terrestre .....	9
Figura 1. 2. Radiación solar en la República Mexicana .....	10
Figura 2. 1. Seguidor solar fijo.....	14
Figura 2. 2. Seguidor solar de dos ejes .....	15
Figura 2. 3. Seguidor solar de un eje .....	15
Figura 2. 4 Panel fotovoltaico Monocristalino .....	18
Figura 2. 5 Panel fotovoltaico Policristalino .....	19
Figura 2. 6 Movimiento de la tierra con respecto al sol.....	20
Figura 2. 7 Movimiento del sol a lo largo del día .....	21
Figura 2. 8 Latitud.....	22
Figura 2. 9 Meridiano .....	22
Figura 2. 10 Longitud .....	23
Figura 2. 11 Longitud y Latitud .....	24
Figura 2. 12 Declinación .....	25
Figura 2. 13 Equinoccio .....	26
Figura 2. 14 Nadir y Cenit.....	27
Figura 2. 15 Ecuación del Tiempo .....	29
Figura 3. 1 Colector plano .....	32
Figura 3. 2 Corte transversal de un colector plano básico.....	33
Figura 3. 3 Caminos que sigue la radiación en un colector.....	35
Figura 3. 4 Colectores planos .....	38
Figura 3. 5 Configuraciones de tubos.....	40
Figura 3. 6 Características de rendimiento hipotéticas de una superficie selectiva ideal .....	41
Figura 3. 7 Superficie selectiva.....	42
Figura 3. 8 Tubo en cinta .....	44
Figura 3. 9 Tubo en panel.....	45
Figura 3. 10 Tubo en cinta.....	45
Figura 3. 11 Tubo sobre panel.....	46
Figura 3. 12 Panel tipo oblea.....	46
Figura 3. 13 Aleta en el tubo con unión mecánica .....	47
Figura 3. 14 Tubo con aletas .....	47
Figura 3. 15 Método típico para sellar cubiertas dobles y sencillas.....	48
Figura 3. 16 Junta E para sellar y amortiguar una cubierta doble.....	49
Figura 3. 17 Vista longitudinal de un colector solar plano.....	52
Figura 3. 18 Sección de una placa absorbadora entre los dos tubos.....	54
Figura 3. 19 Sección de una placa absorbadora entre dos tubos .....	55

Figura 3. 20 Red térmica para un colector plano de una cubierta.....	57
Figura 3. 21 Dimensiones de aleta y tubo .....	60
Figura 4. 1. Puente en H con transistores .....	66
Figura 4. 2. Funcionamiento con I1 a nivel alto e I2 a nivel bajo .....	67
Figura 4. 3. Funcionamiento con I1 a nivel bajo e I2 a nivel alto .....	67
Figura 4. 4. Puente H que se ocupa para el movimiento de los motores .....	68
Figura 4. 5. Microcontrolador Arduino .....	68
Figura 4. 6. Potenciómetro.....	69
Figura 4. 7. Diagrama de bloques de un Regulador PID.....	69
Figura 5. 1. Primer diseño del calentador suave .....	74
Figura 5. 2. Tubos: galvanizado PVC y cobre .....	75
Figura 5. 3. Temperatura de tuberías.....	76
Figura 5. 4. Prueba de color .....	78
Figura 5. 5. Prueba de la placa de absorción con lámina negra, lámina normal y sin lámina .....	79
Figura 5. 6. Placa de absorción.....	80
Figura 5. 7. Curva de la placa absorbente y vidrio templado.....	81
Figura 5. 8. Pruebas del vidrio .....	82
Figura 5. 9. Gráfica de vidrio .....	83
Figura 5. 10. Pruebas al unicel.....	84
Figura 5. 11. Gráfico del Unicel .....	85
Figura 5. 12. Aletas y sensor de temperatura .....	85
Figura 5. 13. Placa de absorción.....	86
Figura 5. 14. (a) Absorbedor de calor, (b) Unicel forrado con papel aluminio .....	86
Figura 5. 15. Calentador solar plano .....	86
Figura 5. 16. Medidores de presión y temperatura de entrada y salida.....	87
Figura 5. 17. Diagrama esquemático de los flujos de energía en un colector solar .....	89
Figura 5. 18. Diagrama de conexión sensor de temperatura.....	97
Figura 5. 19. Temperatura de Colector .....	98
Figura 5. 20. Esquema de conexión PID .....	99
Figura 5. 21. Diagrama de flujo PID.....	100
Figura 5. 22. Ubicación de motores .....	101
Figura 6.1 Base del montaje de la celda fotovoltaica y el calentado solar .....	100
Figura 6.2 Pieza para realizar el movimiento de altura solar .....	100
Figura 6.3 Parte superior de la base del movimiento Azimut .....	100
Figura 6.4 Parte superior de la base móvil, para realizar el movimiento Azimut.....	101
Figura 6.5 Parte lateral que realiza el movimiento altura solar.....	101
Figura 6.6 Parte superior que realiza el movimiento Azimut.....	102
Figura 6.7 Parte lateral del soporte de la base.....	102
Figura 6.8 Tornillo con cuerda ACME.....	102

Figura 6.9 Base del seguidor.....	103
Figura 6. 10 Parte superior base movimiento Azimut.....	103
Figura 6. 11 Eje para montaje de motor movimiento Azimut.....	103
Figura 7. 1 Altura solar PID.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Figura 7. 2 Movimiento altura solar .....	107
Figura 7. 3 Error PID de altura solar .....	108
Figura 7. 4 PID Azimut .....	108
Figura 7. 5 Movimiento azimut .....	109
Figura 7. 6 Análisis de la respuesta del PID en Azimut.....	110
Figura 7. 7 Celda solar en posición fija .....	111
Figura 7. 8 Celda solar con seguidor.....	112
Figura 7. 9 Prototipo de Seguidor solar.....	112
Figura 7.11 Calentador Solar fijo y con seguidor solar.....	111

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Energía solar

El Sol es, desde siempre, la principal fuente de energía en la Tierra. El Sol está en el origen de casi todas las energías renovables. El calentamiento de la tierra y del agua provoca las diferencias de presión que dan origen al viento, fuente de la energía eólica. La energía hidráulica también debe su existencia al Sol ya que este es el que provoca el ciclo del agua. En el proceso de fotosíntesis el Sol es un actor imprescindible; por lo tanto, es necesario para la energía que utiliza la biomasa.

Además se puede generar energía directamente mediante la captación de la luz y el calor emitidos por los rayos del Sol. La energía solar es un tipo de energía de las conocidas como energía verde; aunque, al final de su vida útil, los paneles fotovoltaicos pueden suponer un residuo contaminante difícilmente reciclable hasta la fecha. Dentro de esta generación de energía a partir de la radiación solar, hay varios subtipos. Las distintas tecnologías solares existentes son:

- **Energía solar térmica:** Utilizada para producir agua caliente para uso sanitario y calefacción.
- **Energía solar fotovoltaica:** Producción de electricidad mediante paneles fotovoltaicos que generan energía eléctrica a partir de la radiación solar.
- **Energía solar termoeléctrica:** Producción de electricidad mediante un ciclo termodinámico convencional a partir de un fluido calentado por la radiación solar a alta temperatura (aceite térmico).



- **Energía solar híbrida:** Combina la energía solar con otra energía. Según la energía con la que se combine es una hibridación renovable o fósil.
- **Energía eólico-solar:** Funciona con el aire calentado por el Sol, que sube por una chimenea donde están los generadores.

La potencia de la radiación solar, entre otros factores, depende de la zona en la que se esté situado. Como se puede observar en la figura 1.1 la radiación solar total que llega a la superficie terrestre anualmente depende de la situación geográfica. Influyen factores como latitud, altura y vegetación.

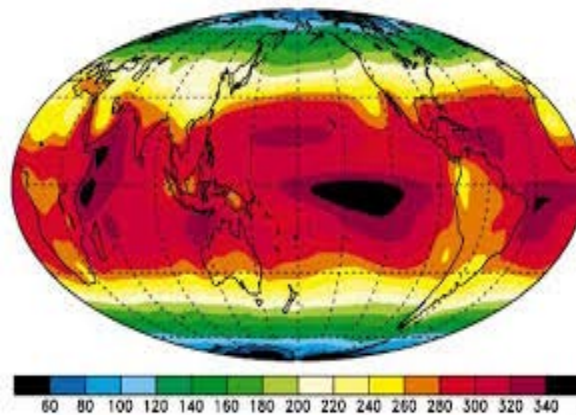


Figura 1. 1. Radiación solar anual que llega a la superficie terrestre

México está ubicado en el cinturón solar de la tierra. El país tiene una alta incidencia de energía solar en la gran mayoría de su territorio; la zona norte es de las más soleadas del mundo. Con una irradiación media anual de aproximadamente  $5 \frac{kwh}{m^2}$  por día. México es uno de los países a nivel mundial que presenta condiciones ideales para el aprovechamiento masivo de este tipo de energía. Sin embargo, este potencial no se ha aprovechado ampliamente.

En México, más de 40 millones habitan en altiplanicies que reciben mayor influjo solar que el recibido a nivel del mar, debido a que por cada 300 metros se incrementa en 6% la radiación ultravioleta. Por su situación geográfica, el invierno

en nuestro país tiene una corta duración y el 70% de la radiación solar se recibe entre los meses de marzo y septiembre.

A diferencia de otras latitudes, el promedio de horas de luz solar en México es de 11 horas en invierno y de casi 13 horas en verano. Esto implica abundancia de radiación solar durante prácticamente todo el año (ver figura 1.2).

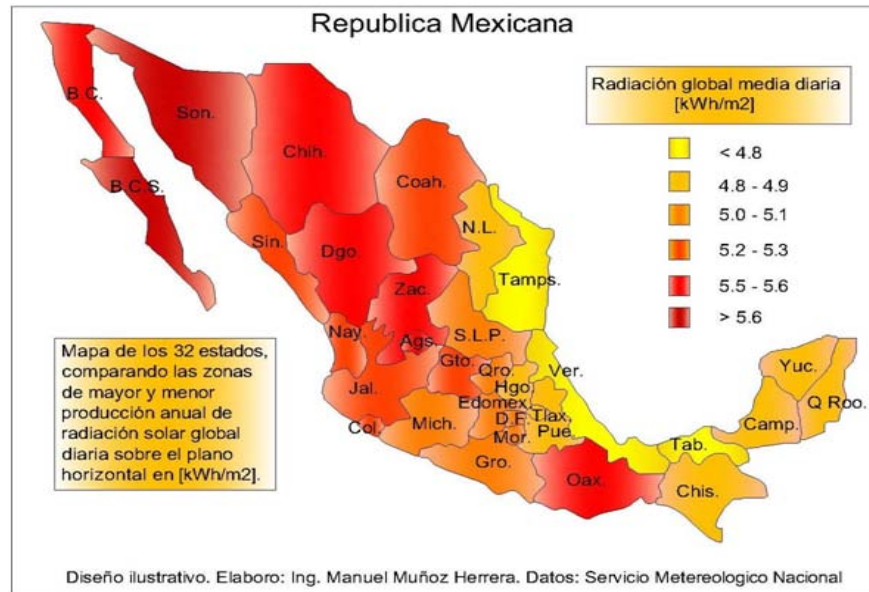


Figura 1. 2. Radiación solar en la República Mexicana

La optimización del aprovechamiento de la energía solar depende de la cantidad de radiación recibida (variable según la época del año), de los materiales utilizados para su captación y de las formas de almacenamiento y consumo de la energía captada. Dado que la utilización común de la energía solar es su aprovechamiento en forma lumínica y térmica. La radiación sólo se produce a lo largo de unas determinadas horas del día, que con frecuencia no coinciden con las del consumo directo de la misma.

Por lo tanto, un factor importante a considerar ha de ser la previsión de almacenamiento de la energía obtenida, de modo que pueda disponerse de ella en los momentos que se precise.

## **1.2 Justificación**

Actualmente se está viviendo la era del uso de las energías renovables, sin embargo, en el caso de la energía solar fotovoltaica se tienen que combinar mecanismos que permitan tener mayor tiempo de captación de energía solar. Esto se ha llevado a cabo mediante el uso de seguidores solares analógicos y digitales que permiten aprovechar la energía del sol durante mayor tiempo.

El desarrollo de un seguidor solar digital contribuye al logro de la competencia del programa de estudios TSU en Energías Renovables con énfasis en fotovoltaica, y de la misma manera a la continuidad del desarrollo de una cultura en el uso racional de la energía a través del conocimiento de la aplicación de las energías renovables, específicamente la energía fotovoltaica y los efectos del cambio climático, así como fomentar el desarrollo sustentable de las mismas.

El presente trabajo de tesis también se enfoca en el sector técnico, para aprovechar la producción de energía a partir de paneles solares o fotovoltaicos térmicos (híbridos), mediante mecanismos automatizados que permiten el giro en dos ejes para la colocación de los paneles solares en la posición correcta y captar la máxima radiación solar.

### **1.3 Objetivo general**

- Diseñar y construir un prototipo didáctico de un seguidor solar térmico (híbrido) con un sistema de control PID que sea eficiente, barato y sencillo.

### **1.4 Objetivos específicos**

- Diseñar mecánicamente el sistema solar térmico híbrido.
- Elaborar un algoritmo para controlar la trayectoria del sol con la mayor exactitud posible.
- Elegir la interfase óptima para el movimiento de los motores.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### **2.1 Seguidores solares**

Para captar la radiación solar, necesaria para la generación de energía fotovoltaica, se utilizan paneles solares situados sobre cubiertas o sobre el suelo. Estos paneles pueden ser fijos o estar situados sobre seguidores solares. La potencia y orientación de la radiación solar varía según el día del año, la hora, las condiciones atmosféricas y la latitud del lugar de la posición del panel solar. Debido a estos cambios en la orientación, la energía solar obtenida por paneles situados sobre seguidores solares es un 30% superior a la obtenida por paneles fijos en un año.

El ángulo de incidencia de la luz solar tiene un papel relevante en la cantidad de energía recibida y, por tanto, en la eficacia del dispositivo (tanto si es fotovoltaico, como térmico). Los seguidores de dos ejes se inclinan de manera que se mantienen siempre perpendiculares a los rayos solares, y los de un eje se inclinan de forma que se mantengan lo más perpendiculares posible a la radiación solar. De esta forma, son capaces de captar más radiación solar y así optimizar la captación de energía mediante paneles fotovoltaicos para su conversión en energía eléctrica

### **2.2 Funcionamiento de seguidores solares**

En los sistemas fotovoltaicos existe la posibilidad de implementar un dispositivo adicional con el fin de aumentar la captación de radiación solar y por ende la energía suministrada por la instalación, tal dispositivo es un seguidor solar.

Un seguidor solar es un dispositivo conformado básicamente por una parte fija y una móvil, cuya finalidad es el aumento de la captación de radiación solar,

para lo cual cuenta con una superficie de captación que debe permanecer perpendicular a los rayos del sol durante el día y dentro de su rango de movimiento. Un seguidor solar es una especie de girasol mecánico, ya que su misión consiste en que su panel solar siga al Sol desde su salida hasta su puesta.

De esta manera, aprovecha la radiación solar mucho mejor que los sistemas solares fijos. La gran variedad de prototipos permite su uso de manera accesible a grandes y pequeños consumidores, por lo que cada vez mas empresas desarrollan dispositivos muy diversos.

Todos los seguidores solares incluyen mecanismos para orientar una placa colectora de forma que ésta permanezca lo más perpendicular posible a los rayos solares. Actualmente, existen varios tipos de seguidores solares que se pueden dividir en tres grandes grupos:

- **Seguidor Fijo:** Son las más robustas y flexibles del mercado, y permiten colocarse en cualquier tipo de terreno con desniveles superiores al 5%.



Figura 2. 1. Seguidor solar fijo

- **Seguidor de dos ejes:** La superficie se mantiene siempre perpendicular a los rayos solares.



Figura 2. 2. Seguidor solar de dos ejes

- **Seguidores solares de un eje:** Se clasifican en:
  - Polar: La superficie gira sobre un eje orientado al Sur e inclinado respecto a la vertical a un ángulo igual a la latitud.
  - Azimutal (vertical): La superficie gira sobre un eje vertical; el ángulo de inclinación de la superficie respecto a un plano horizontal es igual a la latitud.
  - Horizontal: La superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección Norte - Sur.



Figura 2. 3. Seguidor solar de un eje

Como en el seguidor de dos ejes (la superficie se mantiene siempre perpendicular a los rayos solares), es el que consigue un mayor aprovechamiento de la energía solar. La ganancia energética no depende sólo del tipo de seguidor,

si no también depende en gran medida del emplazamiento. Debido a que la mecánica de los seguidores de dos ejes es complicada, en algunas ocasiones no resulta rentable (teniendo en cuenta el incremento de energía obtenida), por lo que en esos casos es más común la utilización de seguidores solares de un eje.

En los seguidores es usual que el soporte y el movimiento de la placa se realicen con una columna única. Si se tiene una placa colectora grande se producen intensos momentos mecánicos en el punto de giro causando un desgaste intenso. Además, al necesitar soportar grandes momentos de inercia la columna debe aumentar sus dimensiones por lo que no es factible la instalación de esto seguidores sobre cubiertas.

### 2.3 Ventajas y desventajas de ambos tipos de seguidores

Dentro de los seguidores de un eje y dos ejes existen diferentes características únicas que deben ser consideradas al momento de seleccionar un tipo en específicos, estas características se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 ventajas y desventajas de diversos tipos de seguidores

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Un eje</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor costo</li> <li>• Simplicidad</li> <li>• Posibilidad de adaptación a cubiertas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguimiento solar Impreciso</li> <li>• Menor energía captada</li> </ul>
<b>Dos ejes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementos de la producción en torno al 35% con respecto a una planta fija.</li> <li>• Seguimiento solar más preciso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo</li> </ul>

### 2.4 Tipos de Controles

Actualmente existen diferentes tipos de algoritmos de control, para automatizar los seguidores solares. Los cuales se mencionan a continuación.



### **Aplicando criterio de luminosidad**

El algoritmo de este tipo de seguidor basa su funcionamiento en la señal entregada por uno o varios sensores, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más adecuado de luminosidad. Este tipo de seguimiento resulta ser de fácil implementación.

### **Aplicando criterio de programación astronómica**

Este tipo de seguidor presenta una total independencia de las condiciones climáticas ya que su algoritmo no requiere de sensores que indiquen cual es el punto más luminoso. El seguimiento en este caso, depende únicamente de una serie de ecuaciones que predicen la ubicación del sol en cualquier momento. Aunque este tipo de seguidor resulta ser de gran precisión, cabe mencionar que la implementación del algoritmo representa un alto grado de complejidad.

## **2.5 Paneles fotovoltaicos**

Los paneles solares son dispositivos que se encargan de transformar parte de la radiación solar que incide en ellos en energía eléctrica y sus principales componentes son las celdas de silicio. Los paneles fotovoltaicos están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad, las cuales comúnmente son llamadas celdas fotovoltaicas y dependen del efecto fotovoltaico para transformar la energía del sol y hacer que una corriente pase entre dos placas con cargas eléctricas opuestas.

La conversión de las celdas fotovoltaicas oscila entre 8% y el 29% de eficiencia. Pese a lo anterior, ha habido una tendencia en la disminución del precio de los sistemas modernos de electrónica de potencia y las celdas fotovoltaicas, lo que indica buenas promesas para las nuevas instalaciones. El rendimiento de un sistema fotovoltaico se ve influenciado por su potencia máxima, los cambios de temperatura, la intensidad solar y la carga conectada.

Los sistemas de generación de energía basados en energía solar son hoy en día la solución más prometedora para requerimientos de baja y mediana potencia con la finalidad de reducir el consumo de la energía producida por el petróleo y el gas.

Sin embargo, la relación costo-beneficio de las celdas solares basadas en silicio es aún elevada y su eficiencia es baja en comparación con otras fuentes de energía. Independientemente de la elección del tipo de celda solar, los módulos fotovoltaicos deben estar conectados a un sistema de conversión de energía, con el fin de gestionar la energía producida y proporcionar una interfaz adecuada a la carga como los son convertidores electrónicos no lineales que operan en modo de conmutación. Existen tres tipos de paneles fotovoltaicos:

- **Monocristalino:** Están formados en secciones con una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En algunos análisis desarrollados en laboratorios se han alcanzado rendimientos máximos del 24.7%, a diferencia de los que actualmente existen en el mercado que alcanzan un 16%.



Figura 2. 4. Panel fotovoltaico Monocristalino

- **Policristalino:** Los materiales son semejantes a los monocristalinos, sin embargo el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones.



Figura 2. 5. Panel fotovoltaico Policristalino

- **Amorfo:** Basados también en el silicio, pero a diferencia de los anteriores este material no sigue una estructura cristalina. Los paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos como calculadoras, relojes y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo ha sido del 13% y los de uso comercial solo alcanza el 8%.

## 2.6 Carta solar

Junto a las condiciones atmosféricas hay otro factor que determina la incidencia de la radiación sobre el captador solar, el movimiento aparente del Sol a través de la bóveda celeste, a lo largo del día y del año.

La Tierra describe un movimiento de traslación alrededor del Sol (ver figura 2.6) que sigue una trayectoria en forma de elipse, con una excentricidad de un 3%. La línea imaginaria que representa la órbita descrita se llama eclíptica. Esta órbita define el plano de la eclíptica. En su movimiento de traslación el eje de rotación terrestre forma siempre el mismo ángulo de  $23.45^{\circ}$  con la perpendicular al plano eclíptica.

El ángulo que forma el plano de la eclíptica con el plano del ecuador varía a lo largo del año. Este ángulo, conocido como declinación, varía entre  $-23.45^{\circ}$  el día del solsticio de invierno y  $23.45^{\circ}$  el día del solsticio de verano.

Los trópicos de Cáncer ( $23.45^{\circ}$  Norte) y de Capricornio ( $23.45^{\circ}$  Sur) corresponden a los lugares extremos de latitud tal que el Sol se sitúa en la perpendicular al plano del horizonte un instante al año, al mediodía del solsticio de verano y de invierno, respectivamente.

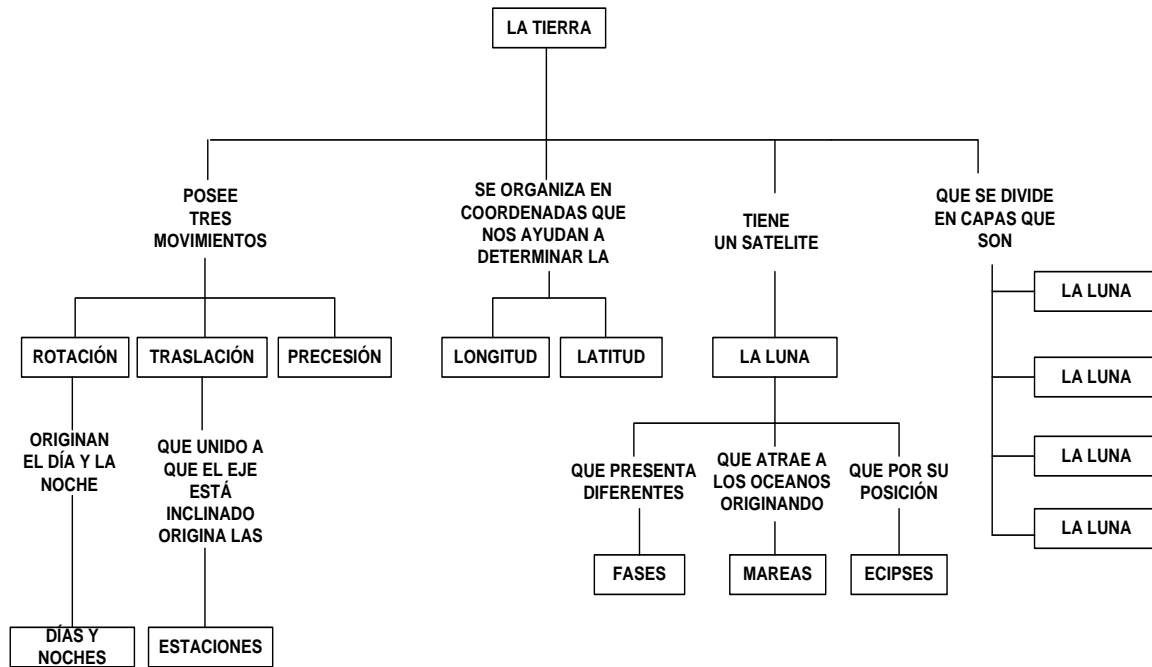


Figura 2. 6. Movimiento de la tierra con respecto al sol

Las cartas solares son instrumentos auxiliares de suma importancia para los arquitectos, ya que a través de ellas se puede saber qué sucede en términos del sol y de sombra en un determinado momento para una posición geográfica específica. Estas proyecciones exponen gráficamente el movimiento del sol en relación a un punto determinado de la tierra.

Cada día el sol, para un observador situado en la tierra, sigue una trayectoria circular a través del firmamento alcanzando su punto más alto al mediodía. Por otra parte, esta trayectoria circular aparente se mueve hacia puntos más altos en el firmamento a medida que el invierno se acaba y llega el verano, estos desplazamientos se puede observar en el esquema de la figura 2.7.

Como se observa en la figura, durante el verano, el amanecer acontece más temprano y el atardecer más tarde.

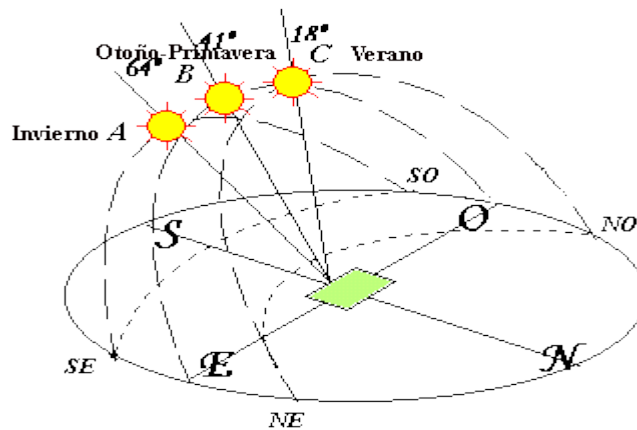


Figura 2. 7. Movimiento del sol a lo largo del día

De la misma manera que para determinar la posición de un punto cualquiera sobre un plano se utiliza un sistema de coordenadas cartesianas, para localizar con exactitud cualquier punto de la superficie terrestre, por lo que se emplea el sistema de coordenadas geométricas expresadas mediante una pareja de números denominados latitud y longitud, los cuales expresan mediciones angulares sobre la superficie de una esfera.

La tierra tiene forma de esfera y como tal, lo mismo que los ángulos o los círculos, sus dimensiones se pueden medir en grados; representada como mapa, la tierra se divide en  $360^\circ$ . La ventaja que tiene emplear expresiones angulares, es que, el ángulo formado por dos rectas es independiente de la longitud de estas.

## 2.7 Latitud

Representa la distancia angular existente entre un determinado punto de la superficie terrestre y el Ecuador (figura 2.8), medida a lo largo del meridiano que pasa por ese punto (por el camino más corto). Se mide en grados, entre  $-90^\circ$  y  $90^\circ$ ; los valores negativos corresponden al hemisferio Sur y los positivos, al Norte.

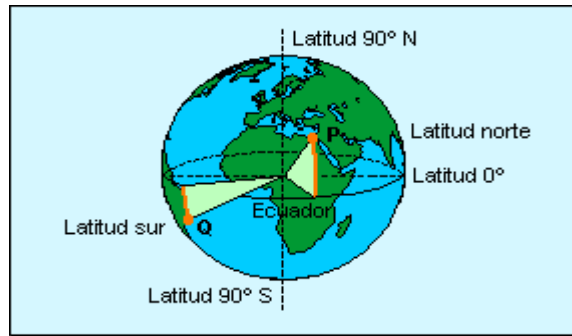


Figura 2. 8. Latitud

### 2.7.1 Meridiano

Los meridianos son los semicírculos máximos del globo terrestre que pasan por los polos norte y sur, son líneas imaginarias las cuales sirven para calcular el uso horario (figura 2.9). Por extensión, son también los semicírculos máximos que pasan por los polos de cualquier esfera o esferoide de referencia. Todos los observadores situados sobre el mismo meridiano ven al mismo tiempo, en la mitad iluminada de la Tierra, al Sol en lo más alto de su curso: el momento en que el Sol está en lo más alto de su curso indica el *mediodía* (es decir, la mitad del día).

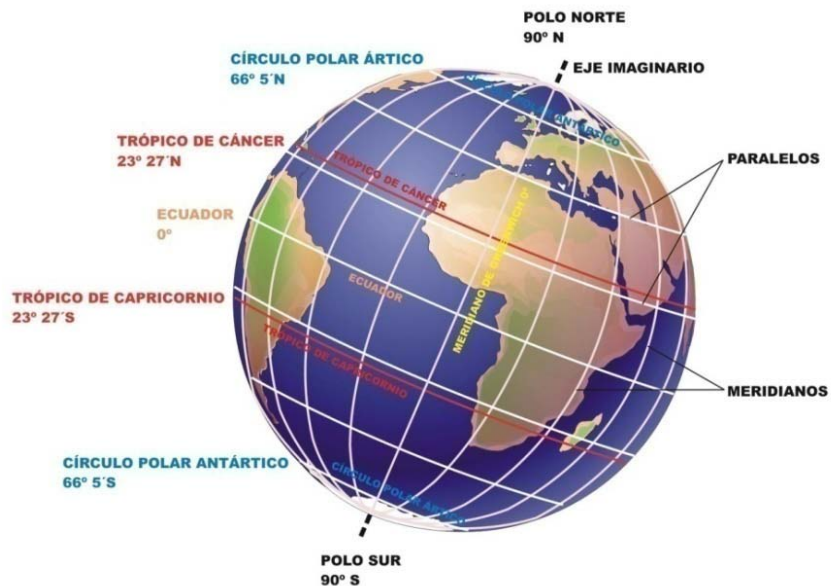


Figura 2. 9. Meridiano

## 2.8 Longitud

Expresa la distancia angular entre un punto determinado de la superficie terrestre y el meridiano que se tome como meridiano de origen (figura 2.10), medida a lo largo de un paralelo (una circunferencia de latitud constante).

Actualmente se emplea como origen el meridiano de Greenwich que se define como la semicircunferencia imaginaria que une los polos y pasa por el antiguo observatorio de Greenwich (Londres). Se expresa en grados, entre  $-180^\circ$  y  $180^\circ$ , siendo positivo hacia el oeste.

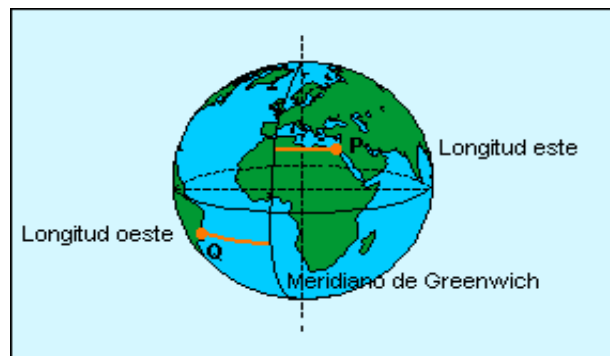


Figura 2. 10. Longitud

### 2.8.1 Ecuador

El ecuador es el plano perpendicular al eje de rotación de un planeta y que pasa por su centro. Divide la superficie del planeta en dos partes: el hemisferio norte y el hemisferio sur.

Por definición, la latitud del ecuador es  $0^\circ$ . El plano del ecuador corta la superficie del planeta en una línea imaginaria (un círculo máximo) que equidista (se encuentra exactamente a la misma distancia) de los polos geográficos (la línea del ecuador equidista del Polo Norte y del Polo Sur geográficos), ver figura 2.11. El círculo ecuatorial de la Tierra mide unos 40, 075 km. Su radio es de 6 371 km.

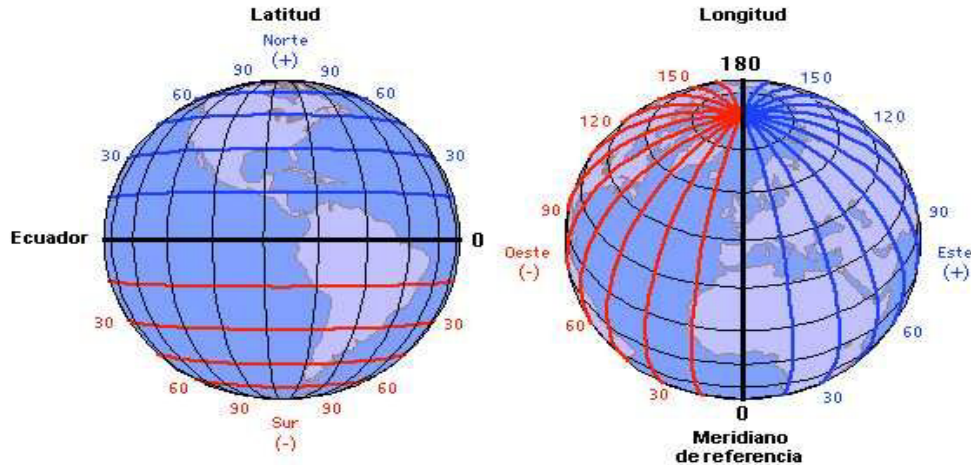


Figura 2. 11. Longitud y Latitud

### 2.8.2 Trópico

Es el plano horizontal en el cual se produce el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, se conoce como plano de la eclíptica.

Ya que el eje de rotación de la Tierra no es perpendicular al plano de la eclíptica, la intersección de este plano con la esfera no coincide con el plano ecuatorial terrestre. La latitud máxima a la que la eclíptica corta a la esfera terrestre es de  $23^{\circ} 26' 16''$  N y  $23^{\circ} 26' 16''$  S; por lo que los paralelos que pasan por estas latitudes tienen una relevancia especial y se les conoce como Trópico de Cáncer (en el hemisferio Norte) y Trópico de Capricornio (en el hemisferio Sur).

### 2.9 Declinación

La Tierra gira sobre un eje imaginario inclinado  $23^{\circ}30'$  respecto de la eclíptica. Este hecho hace que los rayos solares tengan que atravesar un espesor de atmósfera más grande (invierno) o más pequeño (verano) dando paso a las estaciones meteorológicas, diferentes según hemisferio (figura 2.12).



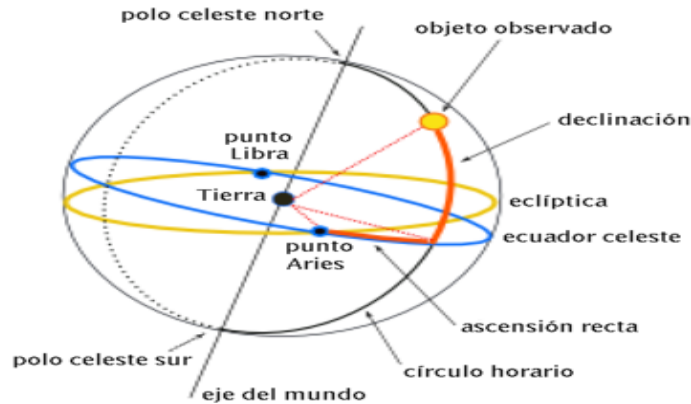


Figura 2. 12. Declinación

La declinación solar es el ángulo entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial celeste (proyección del ecuador terrestre). El valor de la declinación solar varía a lo largo del año, de  $23,45^\circ$  (21 de junio), a  $-23,45^\circ$  (21 de diciembre), pasando por cero en los equinoccios de primavera y de otoño.

En el caso de las zonas tropicales, cuando la declinación solar coincide con la latitud de una determinada zona tropical, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre. Este parámetro, depende el día del año y puede calcularse con la expresión:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left( 360^\circ \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $n$  es el día del año. Cada grado (indicado por el símbolo  $^\circ$ ) se divide en 60 minutos, y cada minuto en 60 segundos.

## 2.10 Perihelio

Es el punto más cercano de la órbita de un cuerpo celeste alrededor del Sol. Es el opuesto al afelio (punto más lejano).

### 2.10.1 Afelio

Se denomina Afelio al punto más alejado de la órbita de un planeta alrededor del Sol y su representación en los sistemas planetarios, mientras que su opuesto denominado perihelio, es el punto más cercano al Sol.

Paradójicamente, nuestro planeta está más caliente cuando estamos más lejos del Sol porque los continentes y los océanos no se encuentran distribuidos uniformemente sobre el globo terrestre, existe más tierra en el hemisferio norte y más agua en el sur y durante el mes de julio, la mitad norte se encuentra inclinada hacia el Sol.

### 2.11 Equinoccio

Se denomina equinoccio al momento del año en que el Sol está situado en el plano del ecuador terrestre (figura 2.13). Ese día y para un observador en el ecuador terrestre, el Sol alcanza el cenit. El paralelo de declinación del Sol y el ecuador celeste entonces coinciden.

Ocurre dos veces por año: el 20 o 21 de marzo y el 22 o 23 de septiembre de cada año, épocas en que los dos polos de la Tierra se encuentran a igual distancia del Sol, cayendo la luz solar por igual en ambos hemisferios.

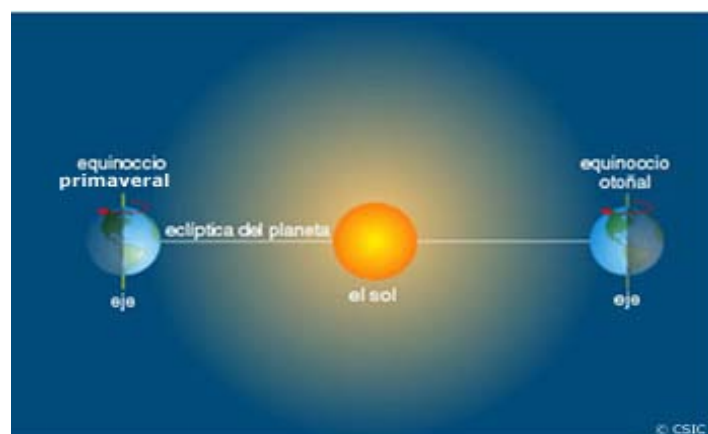


Figura 2. 13. Equinoccio

### 2.11.1 Cenit o cénit

Es la intersección de la vertical de un lugar y la esfera celeste. Es el punto más alto en el cielo con relación al observador, que se encuentra justo sobre su cabeza ( $90^\circ$ ), ver figura 2.14. La vertical de un lugar, o dirección de la gravedad en ese lugar, corta a la esfera celeste en dos puntos. El cénit es el punto que se encuentra por encima de la cabeza del observador.

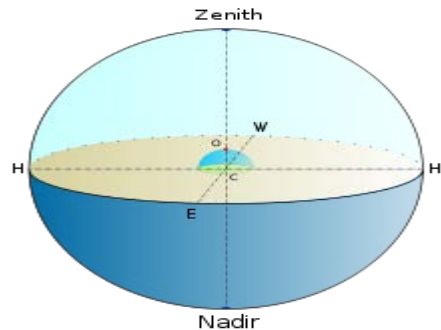


Figura 2. 14. Nadir y Cenit

### 2.11.2 Nadir

Se denomina nadir a la intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste. Es decir, si imaginamos una recta que pasa por el centro de la Tierra y por nuestra ubicación en su superficie, el nadir se encuentra sobre esa recta, por debajo de nuestros pies. En sentido contrario se encuentra el cenit (ver figura 2.14).

### 2.11.3 Esfera Terrestre

La esfera celeste es una esfera ideal, sin radio definido, concéntrica con el globo terrestre, en la cual aparentemente se mueven los astros. Permite representar las direcciones en que se hallan los objetos celestes; así es como el ángulo formado por dos direcciones será representado por un arco de círculo mayor sobre esa esfera.

#### 2.11.4 Solsticio

Son los momentos del año en los que el Sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte (+23° 27') o sur (-23° 27') con respecto al ecuador terrestre.

En el solsticio de verano del hemisferio Norte el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Cáncer y en el solsticio de invierno alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Capricornio. Ocurre dos veces por año: el 20 o el 21 de junio y el 21 o el 22 de diciembre de cada año.

En el solsticio de verano del hemisferio Sur el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Capricornio, y en el solsticio de invierno alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Cáncer. Ocurre dos veces por año: el 20 o el 21 de diciembre y el 21 o 22 de junio de cada año.

#### 2.12 Ecuación del tiempo

Un parámetro importante que tiene que ser considerado en este análisis es la hora solar, la cual difiere de la hora oficial que indica un reloj exacto. Ambos están relacionados entre sí por la expresión:

$$Hora\ Solar = Hora\ oficial + E + 4 (L_{ref} - L_{loc}) \quad (2.2)$$

Donde:

$E$  : Es la ecuación del tiempo en minutos.

$L_{ref}$  : Es la longitud del meridiano de referencia horaria oficial para la zona en cuestión.

$L_{loc}$  : Es la longitud del meridiano del lugar, en grados oeste.

Una forma de evaluar el valor de la ecuación del tiempo  $E$ , en minutos, es mediante la ecuación empírica:

$$\text{Ecuación del tiempo} = 9.87 \text{ sen}(2B) - 7.53 \text{ cos } B - 1.5 \text{ sen } B \quad (2.3)$$

Donde:

$$B = \frac{360}{364} (n - 81)$$

$n = \text{Día del año } (1 \leq n \leq 365) \text{ (Juliano)}$

Además con esta expresión se puede generar una aproximación de la gráfica de la Figura 2.15.

La fecha juliana, día juliano o DJ ( $JD$ , por sus siglas en inglés) es el número de días y fracción transcurridos desde el mediodía del 1º de enero del año 4713 a. c.

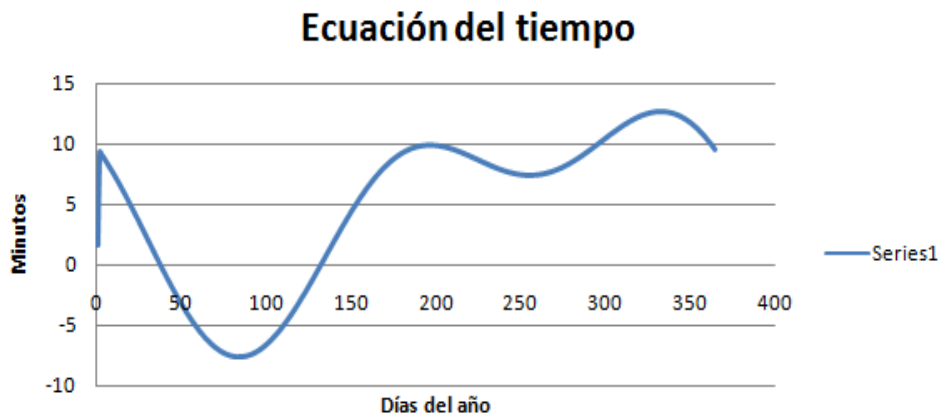


Figura 2. 15. Ecuación del Tiempo

### 2.13 Ángulo horario $\omega$

Por otra parte, el ángulo horario es igual a cero al medio día solar y adquiere un valor de  $15^\circ$  de longitud por cada hora, siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes, así  $\omega = 30^\circ$  a las 10:30 y  $\omega = 15^\circ$  a las 13:00

Una forma de calcular el ángulo horario  $\omega$ , considerando que las 6:00, 12:00 y 18:00 horas se tiene  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $-90^\circ$ .

$$\omega = -\left(\frac{15^\circ}{hr}\right) * (hora\ solar) + 180^\circ \quad (2.4)$$

### **2.14 Altura $\alpha$ y Azimut Solar $\gamma$**

Dado que los movimientos de la Tierra y el Sol son relativos entre sí, en este análisis se supondrá que la Tierra está fija en el espacio, que el Sol describe un movimiento virtual alrededor de ésta, y que el origen del sistema de coordenadas se localiza en el lugar de interés situado en la Tierra.

Desde el punto de vista tolomeico, el Sol está restringido a moverse con dos grados de libertad en la esfera celeste. En consecuencia, su posición en el firmamento queda descrita mediante dos variables angulares: la altura solar  $\alpha$  y el azimut solar  $\gamma$ . Estos dos parámetros son muy importantes ya que definen los movimientos que realizará el seguidor solar de dos grados de libertad.

# Capítulo III

## SISTEMAS DE CAPTACIÓN

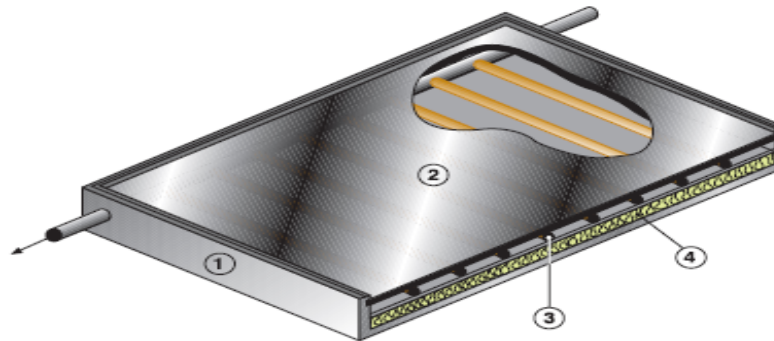
La parte principal de las instalaciones solares, es el captador solar. El colector o panel solar es el componente de la instalación en el que se capta la radiación solar y se convierte en energía calorífica, al calentarse el fluido que circula por su interior. Existen diferentes tipos de colectores solares, según la aplicación a la que se destinen (domesticas, industriales). Los diferentes tipos de colectores solares determinan los diferentes sistemas de Energía Solar Térmica, que suelen clasificarse en baja, media y alta temperatura. La siguiente tabla indica los tipos de colectores.

Tabla 3.1. Tipos de Colectores

TIPOS DE COLECTORES		
CLASE	CARACTERÍSTICAS	TIPOS
COLECTORES DE BAJA TEMPERATURA	-No utiliza ningún dispositivo para concentrar los rayos solares. -La temperatura del fluido a calentar está por debajo del punto de ebullición del agua	- Colectores no vidriados -Colectores de placa plana -Colectores de tubo vacío.
COLECTORES DE MEDIA TEMPERATURA	-Capaces de concentrarla radiación solar en una superficie reducida	- Colectores cilíndrico-parabólicos
COLECTORES DE ALTA TEMPERATURA	-Capaces de concentrarla la radiación en un solo punto -La temperatura de trabajo oscila desde 400 °C hasta 1000 ° C. -No se usa de modo comercial tan solo para investigación. -Utiliza un campo heliostático espejos que siguen la trayectoria del sol automáticamente y concentran la radiación.,	-Colector de campo heliostático >1000 °C - Colector de espejo parabólico 900 °C

### 3.1 Colectores planos

Los colectores planos se emplean exclusivamente en instalaciones a baja temperatura. Los convertidores solares planos aprovechan el efecto invernadero, La conversión se realiza mediante una placa metálica que transfiere la energía térmica a un líquido en contacto con la placa. Los componentes típicos de colector solar plano son la placa, la cubierta, el aislante y la envolvente o carcasa.



1. Caja o cubeta soportadora del conjunto
2. Cristal
3. Tubos conductores del fluido transportador del calor captado
4. Aislante térmico

Figura 3. 1. Colector plano

El colector plano está diseñado para suministrar energía a temperaturas hasta de 65° C aproximadamente sobre la temperatura exterior (ambiental). Sus temperaturas máximas de operación en condiciones de flujo son del orden de 65.5° C a 115. 5° C. Capta la radiación directa, la difusa y la reflejada, no tiene que estar orientado directamente hacia el sol a todas horas y requiere un mantenimiento mínimo a lo largo de su vida útil. Correctamente diseñado y construido, el colector plano puede durar de 20 a 25 años o más, dependiendo del diseño. El costo de la energía suministrada por un colector plano depende de su rendimiento térmico, su costo instalado y su vida útil efectiva.

El rendimiento de los colectores planos se conoce bien y se puede predecir. Por lo general, el rendimiento o eficiencia del colector se mide como la razón entre la energía que incide sobre el colector (energía disponible) expresada por la fórmula:



$$\frac{\text{Energía captada}}{\text{Energía disponible}} * 100 = \% \text{ de eficiencia del colector} \quad (3.1)$$

Tres factores principales influyen en la eficiencia del colector plano:

- 1.- La razón a la cual se extrae el calor del colector, se representa con  $F_R$ .
- 2.- Las pérdidas de calor en el colector, se representa con  $U_L$ .
- 3.- La cantidad de energía transmitida a través de la cubierta y absorbida por la placa, se representa con  $\tau\alpha$ .

Si se conocen estos tres factores es posible pronosticar con precisión el rendimiento del colector. Por lo general se establecen y se controlan al diseñar cuatro partes principales del colector:

- Las cubiertas transparentes.
- La capa que cubre a la placa de absorción (superficie de absorción).
- La placa de absorción.
- El aislamiento del colector.

La figura 3.2 muestra un corte transversal de un colector plano básico.

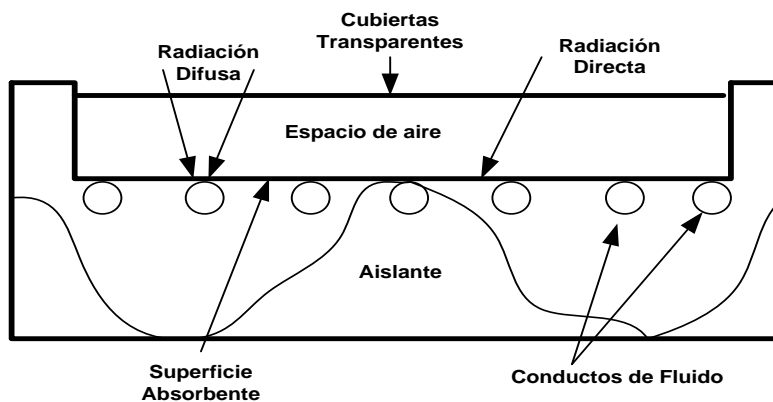


Figura 3. 2. Corte transversal de un colector plano básico

## La cubierta

Es una superficie transparente de 3 ó 4 mm de grosor, que permite aprovechar más energía ya que hace posible que se produzca el efecto invernadero impide que la radiación infrarroja emitida por el absorbedor se pierda, posibilitando que la misma vuelva al absorbedor y sea aprovechada. Los materiales más empleados son:

- El vidrio, que debe haber sido sometido a un procedimiento de templado y con bajo contenido de óxidos de hierro.
- Las cubiertas de plástico tienen similares propiedades ópticas que el vidrio, pesan poco y son frágiles, además tiene baja conductividad térmica.
- Algunas cubiertas poseen doble vidrio, pero con esto se eleva el precio y las pérdidas ópticas, y no aporta mayores beneficios.

La superficie debe absorber la energía que incide sobre una superficie transparente, reflejada desde la superficie o transmitida a través de la superficie. Expuesto de otro modo:

$$\boxed{\text{ENERGÍA TOTAL}} = \boxed{\text{ENERGÍA REFLEJADA}} + \boxed{\text{ENERGÍA TRANSMITIDA}}$$

$\boxed{\text{ENERGÍA ABSORBIDA}}$

Que la energía sea absorbida, reflejada o transmitida dependerá de:

- La longitud de onda de la energía, o sea la longitud de cada pulso.
- El ángulo de incidencia, o sea el ángulo con el cual cae la superficie.
- El índice de refracción del material, medida relativa que indica cuánta energía absorberá la superficie.
- El índice de absorción del material, medida relativa que indica cuanta energía absorberá la superficie.

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

Al mismo tiempo, un buen vidrio sobre el colector no debe presentar una superficie reflectora o que puede observar gran cantidad de energía. Para fines de captación, la energía reflejada por la cara exterior del vidrio, ayudará a conservar las temperaturas dentro del colector. La figura 3.3 indica los caminos que sigue la radiación en un colector.

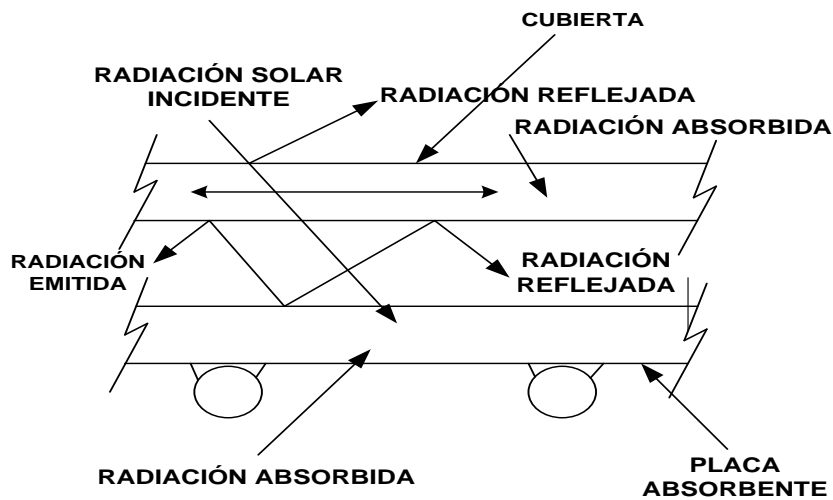


Figura 3. 3. Caminos que sigue la radiación en un colector

El sol emite radiación de onda corta, con longitudes de onda de 0.2 a 3 micras. La energía calorífica que emite la placa de absorción en el interior del colector es radiación de onda larga, con longitudes de onda mayores de 3.0 micras.

Las mejores cubiertas de colector deberán tener las características siguientes:

- Elevada transmitancia de ondas cortas (baja refractancia)
- Baja transmitancia de ondas largas (elevada refluctancia)
- Baja absortancia a cualquier longitud de onda.
- Excelente resistencia al clima y larga duración.

En la tabla 3.2 se comparan diversos materiales empleados para la cubierta del colector.

Tabla 3.2. Comparación de diversos materiales que se usan para cubierta del colector

<b>Tipo de cubierta</b>	<b>Porcentaje de Transmitancia de energía solar (onda corta)</b>	<b>Porcentaje de Transmitancia de energía solar (onda larga)</b>	<b>Índice de Refracción</b>	<b>Durabilidad y resistencia al clima</b>
Vidrio Blanco	91.5	2	1.50	EXCELENTE
Vidrio Templado con bajo contenido de hierro	87.5	2	1.51	EXCELENTE
Láminas de vidrio con bajo contenido de hierro	87.5	2	1.51	EXCELENTE
Vidrio Flotado y Templado	84.3	2	1.51	EXCELENTE
Fibra de vidrio	77 a 87	0.1 a 0.3	1.54	ACEPTABLE A BUENO
Láminas Acrílicas	80 a 90	2	1.49	REGULAR A BUENO
Láminas de Policarbonato	73 a	2	1.59	DEFICIENTE A BUENO
Teflón FEP	90 a 92	25 a 56	1.34	ACEPTABLE A BUENO
Láminas Acrílicas	80 a 90	2	1.49	REGULAR A BUENO
Láminas de Policarbonatos	73 a 84	2	1.59	DEFICIENTE A BUENO
Teflón FEP	90 a 92	25 a 56	1.34	ACEPTABLE A BUENO
Película de Poliéster	80 a 87	20 a 21	1.64 a 1.67	ACEPTABLE A BUENO

## **El aislante**

Se emplea para reducir las pérdidas térmicas a través de los laterales y del fondo de la carcasa del colector, que debe ser de baja conductividad térmica. Los materiales pueden ser lana de vidrio, lana de roca, corcho, espuma de poliuretano. Se suele adherir al sistema de aislamiento una lámina reflectante de aluminio, que refleja la radiación emitida por la placa absorbadora, reduciendo las pérdidas de calor por la parte posterior del colector solar.

Para máxima eficiencia del colector, debe estar aislado por detrás y por los lados. Las pérdidas que se producen por detrás, son función de la conductividad térmica y el espesor del aislamiento. La temperatura ambiental es normalmente más baja en la parte posterior que en el frente del colector.

En un colector bien diseñado, en el cual el aislamiento de los lados tiene un valor  $R$  equivalente al respaldado, las pérdidas son pequeñas y se pueden calcular aproximadamente, suponiendo que el calor escapa por el área del perímetro.

Hay cuatro tipos básicos de aisladores que se pueden considerar:

- Fibra mineral
- Fibra de cerámica
- Espuma de vidrio o termoplástica
- Fibra de vidrio

Los aisladores de fibra mineral o de cerámica con excepción de la lana mineral, son materiales diseñados para soportar temperaturas más elevadas que las que suelen encontrarse en los colectores planos; normalmente no se emplean debido a su costo. La lana mineral es un relleno usado que pierde las propiedades aisladoras cuando sufre los efectos del ciclo de humedad. Por lo general no se le considera aceptable.

La espuma de uretano y poliestireno dilatado no tienen buena estabilidad a diferentes temperaturas, tienden a producir gasificación y características de inflamabilidad, son menos que satisfactorias. Su empleo se debe limitar en colectores en los que quedan completamente encerrados en su propio gabinete, separados de la cubierta y de la placa de absorción. La espuma de vidrio tiene buenas características por lo que se le considera buen aislante.

En general la fibra de vidrio, de la calidad que suele emplearse en las construcciones, no es satisfactoria. Está elaborada con grandes cantidades de aglutinantes fenólicos cuyo límite superior de temperatura es inferior a las temperaturas de estancamiento que se pueden encontrar en los colectores.

### **La carcasa**

Permite conformar todos los elementos que componen el colector. Es de aluminio o acero galvanizado para resistir la corrosión y posee las ranuras de fijación adecuadas para anclar y sujetar el colector al edificio o a su soporte. Entre la cubierta y la carcasa se emplea una junta de cubierta, que es un elemento de material elástico, cuya función es asegurar la estanqueidad de la unión entre ambos. Servirá a su vez, para absorber las diferencias en las dilataciones entre la carcasa y la cubierta, para que no se produzca rotura en ningún elemento del captador.



Figura 3. 4. Colectores planos

La caja de un colector bien diseñado desempeña tres funciones:

- Constituye un recipiente hermético para la placa de absorción y los aisladores.
- Permite con firmeza el módulo conductor con la estructura.
- Es un mecanismo de apoyo, hermético y seguro para la cubierta.

Los tipos más comunes de fabricación son:

- Aluminio
- Lámina galvanizada
- Fibra de vidrio laminado
- Termoplásticos para alta temperatura
- Madera
- Concreto en forma de panal, de peso ligero

Los puntos de la caja del colector que normalmente causan problemas son los ajustes y ensamblajes de las piezas. Es necesario asegurar sobre todo el respaldo y la cubierta a los lados. Hay que recordar, particularmente tratándose de metales, que durante el ciclo térmico se producen dilataciones y contracciones, que deben ser considerados al diseñar y al ensamblar.

### **La placa o absorbedor**

Recibe la radiación solar y la convierte en calor que se transmite al fluido caloportador. Las placas son de cobre, cobre-aluminio o acero, incorporando una capa de cromo negra sobre níquel o similar, conseguida mediante un tratamiento electroquímico, que aumenta su absorción. Si esta superficie es negra y de textura mate, captará mejor la energía que si es de cualquier otro color. Por esta razón, los fabricantes de colectores solares oscurecen el absorbedor, mediante pinturas que resistan temperaturas superiores a los 100 ° C.

Como se menciono anteriormente los tratamientos se realizan por tratamientos electroquímicos o pinturas con óxidos metálicos, cuyo objetivo es captar la radiación y tener baja emisión. Los colectores que han sido sometidos a este tratamiento reciben el nombre de selectivos. Con este tratamiento pueden llegar a un rendimiento del 95%.

Los tratamientos electroquímicos encarecen la fabricación, sin compensar el rendimiento anual de los captadores, además, los captadores que han recibido este tratamiento alcanzan temperaturas de equilibrio más altas, lo que implica mayores esfuerzos mecánicos por dilatación y a menudo, evaporación del fluido caloportador.

Los colectores presentan formas diversas pero en general, los más usados son los de tubos verticales paralelos y los de serpentín. Los primeros constan de una serie de tubos verticales que se encuentran conectados por sus extremos inferior y superior con otros tubos horizontales de mayor diámetro llamados distribuidores, por los que entra el agua fría (inferior) y sale el agua ya calentada por la radiación (superior).

En los de tipo serpentín, se calientan una placa que lleva adherida un tubo en forma de serpentín por la parte posterior. El serpentín está también conectado en sus extremos a unos conductos de distribución. La cara plana es la que se expone al sol para captar la mayor cantidad de rayos. En cuanto a la transmisión del calor desde la placa al líquido, es muy importante que el serpentín esté bien adherido a la placa para reducir al máximo las pérdidas térmicas.

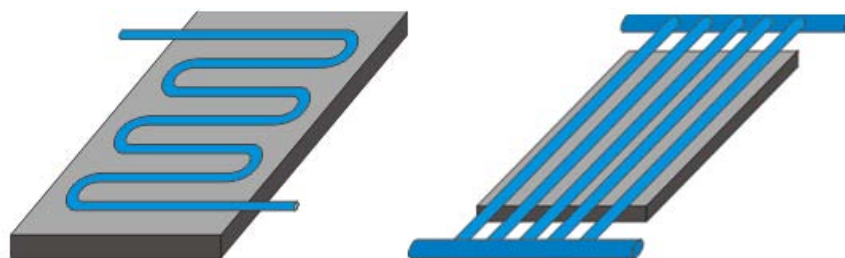


Figura 3. 5. Configuraciones de tubos



La placa de absorción del colector es la parte que recoge la energía transmitida a través de la cubierta de vidrio. Debe ser capaz de recoger y retener esa energía y estar construida de tal forma tal, que el medio de transferencia al calor pueda tomarla en forma eficiente. Obviamente la capa que cubre la capa de absorción y la configuración del flujo en la placa son sumamente importantes para la efectividad del colector.

### Capas de absorción

La superficie de la placa de absorción se cubre con una capa para mejorar su capacidad de captación y retención de la energía. Se emplean dos tipos generales de recubrimientos superficies selectivas y superficies no selectivas. Las superficies selectivas absorben la mayor parte de la luz solar que incide sobre ella y emiten muy poca radiación térmica. También las no selectivas absorben a mayor parte de la luz solar, pero emiten una gran cantidad de radiación térmica.

Las superficies selectivas se definen normalmente en términos de energía por longitudes de onda. La superficie absorberá una gran cantidad de energía solar de onda corta y emitirá muy poca energía calorífica (infrarroja) de onda corta. La figura 3.6 muestra el comportamiento de una superficie selectiva ideal. Reflejaría menos del cinco por ciento de la radiación solar, o sea que absorbería el 95%; pero en la banda del infrarrojo, la mayor parte de la energía sería reflejada.

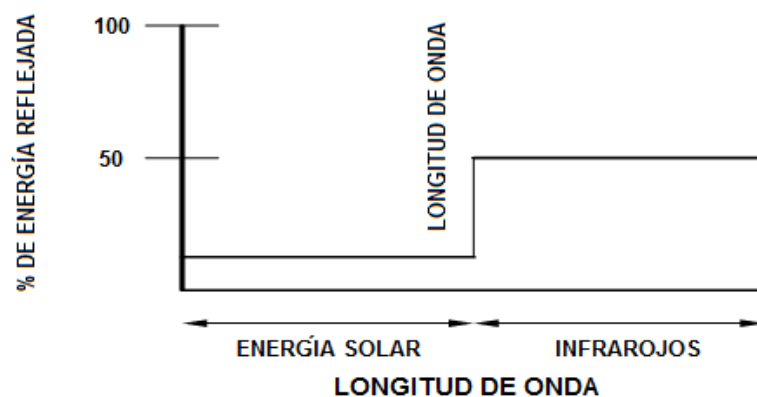


Figura 3. 6. Características de rendimiento hipotéticas de una superficie selectiva ideal

No existen las superficies ideales. Las realmente selectivas no tienen una longitud de onda crítica bien definida, ni tienen propiedades uniformes en las bandas de onda larga y onda corta (figura 3.7). De esta manera los valores de emisión responden por lo general a las temperaturas de la placa de absorción que a las longitudes de onda de energía.

Si se aplican recubrimientos con elevada absorción para la energía solar y elevada transmitancia de radiación infrarroja (placas de absorción cuya emisión sea baja), el resultado será una captación eficiente con poca re-radiación. La baja emisión de ondas largas se obtiene normalmente renunciando a alguna absorción de energía solar, por lo tanto, se busca un equilibrio eficiente entre las dos propiedades. También debe considerarse cuidadosamente el costo y la vida útil de los recubrimientos.

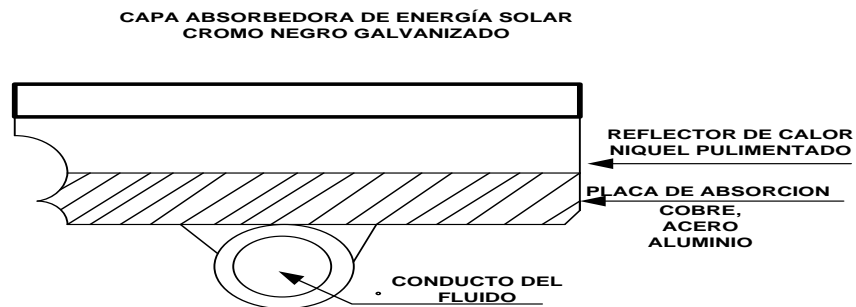


Figura 3. 7. Superficie selectiva

Muchos colectores se diseñan con superficies no selectivas, por ejemplo, con una capa de pintura negra que son bastantes eficientes. La superficie selectiva no es requisito esencial para fabricar un buen colector, pero mejora la eficacia con respecto a la de las superficies no selectivas. La placa de absorción se baña primero con un metal (por ejemplo el níquel). Esto protege contra la corrosión o disminuye la emisividad. El níquel se recubre luego por galvanoplastia con negro de cromo. Esto produce una capa de absorción de alto índice para las longitudes de onda de la radiación solar, pero que es transparente a infrarrojo.

Este recubrimiento con un espesor correcto, dará de 95% a 96% de absorción y de 9% a 12% de emisión. Su temperatura de descomposición excede los 800 °F y la humedad no le afecta.

En cambio, la superficie no selectiva cubierta con pintura negra tendrá una absorción del orden del 97%, pero su emisividad será también del 97%. Se están produciendo pinturas selectivas, la cual ofrece 90% de absorción y 30% de emisividad. La curva de rendimiento térmico del colector indicará su eficiencia térmica general, incluyendo la capa de recubrimiento.

### **Placa de absorción**

La placa de absorción puede ser de cualquier material plástico, de caucho o metal capaz de absorber la radiación solar. Debe tener conductos para que circule el líquido o el aire que extrae el calor captado. En los colectores de buena calidad se emplea cobre, aluminio, acero al carbón, acero inoxidable o una combinación de ellos. La placa de absorción desempeña diversas funciones dentro del colector:

- Capta y reúne la radiación solar.
- Transmite a un líquido o al aire el calor generado por la radiación solar.
- Cuenta con pasajes o conductos a través de los cuales circula el líquido o el aire por el colector, para recoger el calor.

### **Configuraciones de la placa**

En el caso de los colectores planos del tipo líquido, la placa de absorción puede tener varias configuraciones confiables. Entre ellos figuran los siguientes:

- Tubo en cinta
- Tubo en panel
- Tubo sobre cinta
- Tubo sobre panel

- Panel tipo oblea
- Aleta en el tubo
- Tubos con aleta

### Tubos en cinta

Con este método de producción, se estira una larga cinta metálica que lleva un tubo integrado. Un colector típico puede contener aproximadamente 30.48 m de tubo y cinta dobladas en forma de serpentin, con los bordes de las aletas adyacentes atornilladas mecánicamente o soldados entre sí (figura 3.8). Tiene la desventaja que los tubos están muy separados y que solo hay un conducto que recorre todo el panel. Si llega a atascarse el líquido dejaría de funcionar. La eficacia de las aletas tiende a ser baja. El tubo en cinta se puede usar también con elevadores paralelos soldados a los múltiples superior e inferior.

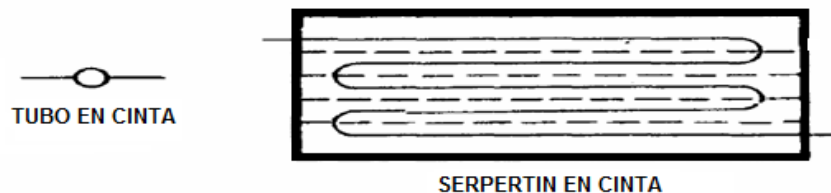


Figura 3. 8. Tubo en cinta

### Tubo en panel

En esta configuración se estampa un patrón acanalado en una lámina de cobre o aluminio (figura 3.9). Se coloca una segunda lámina sobre la primera y las dos se pasan por un laminador caliente para que se adhieran. Las láminas no se unen donde se puso el estampado. El sándwich recocido se coloca entre dos prensas y se inyecta aire a muy alta presión para inflamar los canales. Este sistema se caracteriza por una gran flexibilidad de circulación. Variando el estampado se puede obtener cualquier configuración y tamaño de tubo para modificar la superficie mojada y la eficiencia de las aletas.

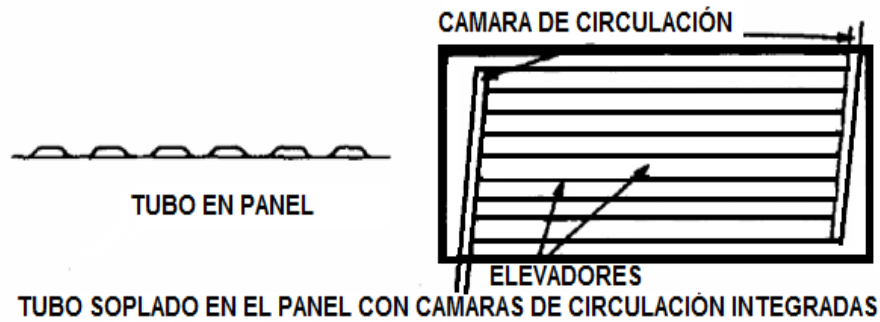


Figura 3. 9. Tubo en panel

**Tubo sobre cinta.** Con soldadura de alto punto de fusión se une un tubo de metal a una cinta de absorción. Se sueldan varias cintas a los múltiples, superior e inferior para formar un conjunto de elevadores paralelos, ver figura 3.10.

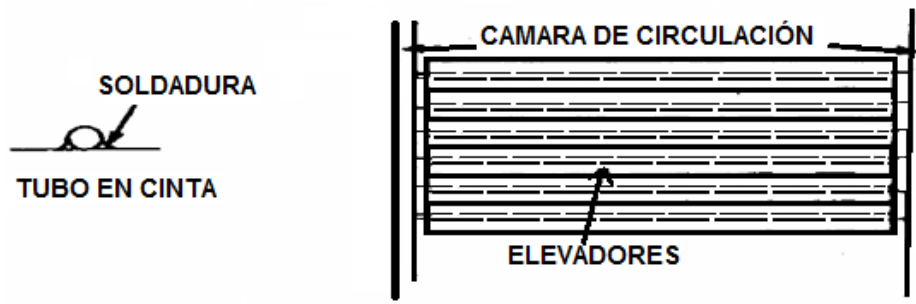


Figura 3. 10. Tubo en cinta

**Tubo sobre panel.** La técnica es similar a la del tubo sobre cinta. Es un método popular y comprobado para fabricar placas de absorción. Tiene la ventaja de que, si se desea, se puede ensamblar previamente los múltiples y los elevadores para probarlos. La placa de absorción puede también ir extendida sobre el múltiple. Con frecuencia, la placa recibe previamente la forma de los canales donde entrarán los elevadores y los múltiples (figura 3.11).

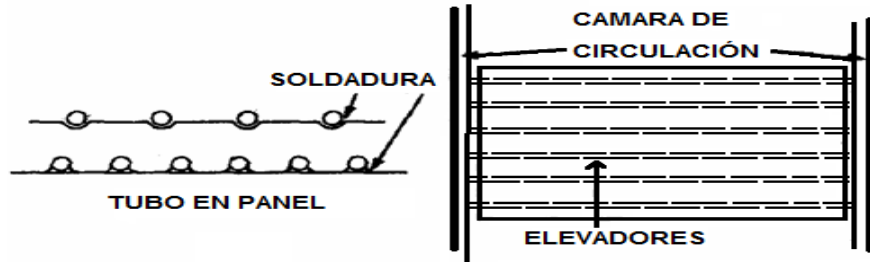


Figura 3. 11. Tubo sobre panel

### Panel tipo oblea

Conocido con muchos nombres y presentando un número infinito de variantes, el panel oblea consiste en dos piezas de metal, generalmente acero, soldadas en varios lugares. La construcción del panel resulta muy fuerte y el área mojada es muy grande (la mayor parte es ocupada por el fluido de transferencia). Es definitivamente una fabricación de alta calidad. Sus desventajas son: el peso del acero, su tendencia a oxidarse con facilidad a menos que se proteja la superficie. Los paneles son pesados y su tiempo de respuesta es lento (figura 3.12).

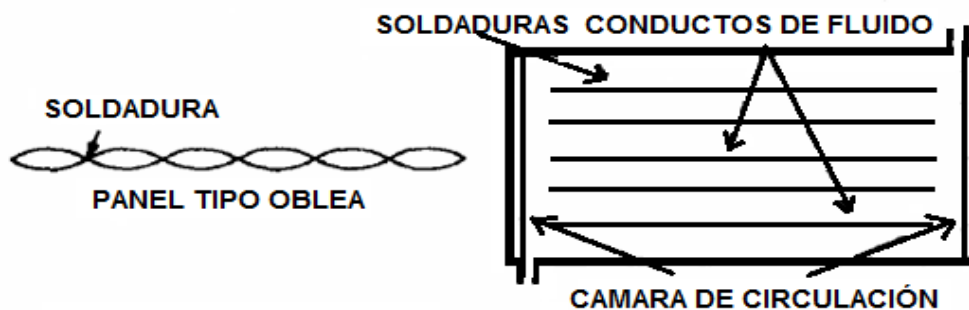


Figura 3. 12. Panel tipo oblea

### Aleta en el tubo

En este método de producción se fija mecánicamente una aleta separada a los tubos elevadores. No hay unión metálica entre el tubo y la aleta, de manera que se pueden presentar deficiencias en la transferencia de calor. Si se producen en un determinado colector, el resultado se reflejará en la eficiencia térmica. La aleta y el tubo son por lo general de metales diferentes, por ejemplo: tubo de cobre y aleta

de aluminio. Con este diseño, hay que tomar en cuenta la corrosión galvánica debido a las condiciones de humedad. Desde el punto de vista mecánico, el diseño del panel es bueno pese a las diferencias de dilatación que tiene lugar cuando se emplean metales diferentes (figura 3.13).

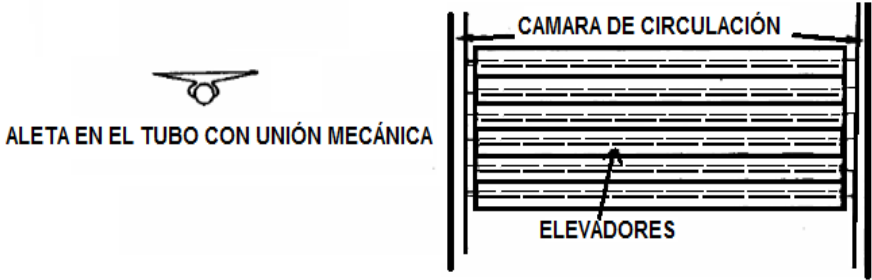


Figura 3. 13. Aleta en el tubo con unión mecánica

**Tubo con aletas**

En el diseño de tubos con aletas de aluminio en los elevadores de cobre, se dilatan para establecer una unión firme. Este diseño representa una aplicación de la tecnología de la calefacción y el acondicionamiento del aire conocido hasta ahora. Es especial en el sentido de que no hay un panel liso de absorción. La radiación solar incide en las aletas, las que actúan como trampas reflectoras que captan y retienen energía (figura 3.14).

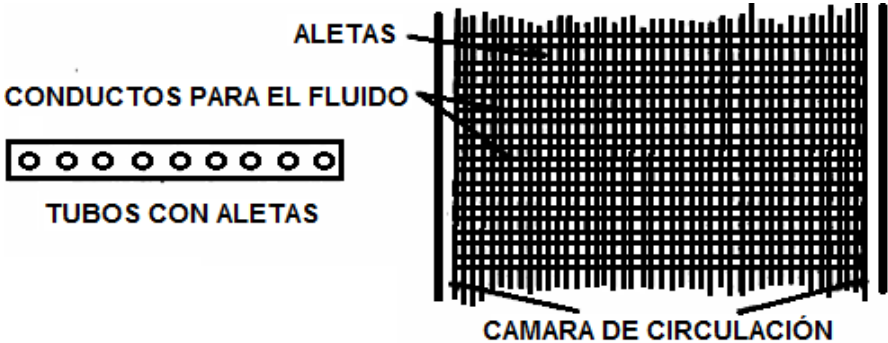


Figura 3. 14. Tubo con aletas

## Juntas selladoras

La parte del colector que causa más molestias es la unión entre la cubierta y la caja. Por lo general, la caja tiene un índice de dilatación diferente al de la cubierta. Si fallan los selladores; la humedad penetra al colector, el vidrio se empaña y el aislante se despeg. Estos problemas pueden reducir notablemente el rendimiento térmico del colector.

Hay muchas maneras de sellar satisfactoriamente la cubierta, aunque ningún método satisface todos los requisitos en todos los casos. Sin embargo, se deben recordar ciertos principios al diseñar o al examinar las juntas y los selladores del colector, los cuales deben tener las características siguientes:

- Resistir la luz ultravioleta durante varios años.
- Resistir los efectos de la intemperie durante varios años.
- No endurecerse ni volverse quebradizos.
- Adherirse perfectamente a todas las superficies.
- Soportar ciclos de temperatura entre  $-34.4^{\circ}\text{C}$  y  $204.44^{\circ}\text{C}$ .
- Alargarse y contraerse en forma suficiente para soportar las dilataciones y contracciones sin ser destruidos.

La figura 3.15 muestra un método para sellar cubiertas sencillas o dobles. Se emplean juntas en “U” para absorber las dilataciones y las contracciones.

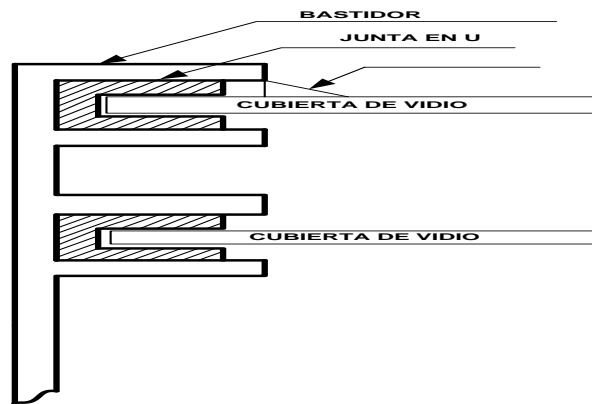


Figura 3. 15. Método típico para sellar cubiertas dobles y sencillas



Se aplica un sellador primario de intemperie para impedir que penetre la humedad; se usa la junta “E” para doble cubierta (figura 3.16). Otro método común consiste en construir unidades de doble cubierta en igual forma que las ventanas de “termovidrio”. Los vidrios se sellan juntos y luego se montan en una junta en “U”, por lo que se recomienda aplicar sellador primario para intemperie.

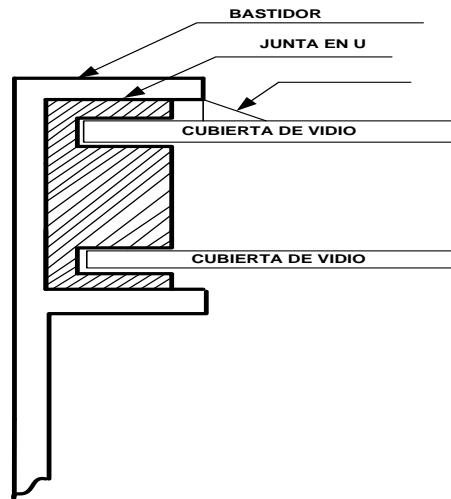


Figura 3. 16. Junta E para sellar y amortiguar una cubierta doble

La elección de juntas y selladores es primordial. Muchos elastómeros no soportarán los efectos de intemperie ni temperaturas propias de la aplicación de que se trate. En el caso de juntas, se ha encontrado que los cauchos EPDM y el silicón son adecuados. El EPDM tiene una resistencia limitada a temperaturas de 148.8°C ó 176.6°C, mientras que el silicón tiene un límite mucho más alto. En cuanto a los selladores, la industria ha aceptado casi exclusivamente los silicones. Cuando se emplean selladores de silicón hay que tomar varias precauciones, se debe evitar la anchura y la profundidad del reborde que sea de 2 a 1, y no se debe usar un reborde sellador de menos de 0.3175 cm ni de más de 1.27 cm.

Las bases son necesarias para asegurar la adherencia máxima entre el sellador de silicón y ciertas superficies. En la tabla 3.3 se puede ver recomendaciones de *Dow Corning* en cuanto a bases y preparación de superficies cuando se usan selladores de silicón.

Tabla 3.3. Recomendaciones sobre imprimadores y preparación de superficies

<b>MATERIAL BASE</b>	<b>PREPARACIÓN DE LA SUPERFICIE</b>	<b>IMPRIMIDOR RECOMENDADO</b>
VIDRIO SUPERFICIES VIDRIADAS	FROTAR CON SOLVENTE ELIMINADOR DE GRASAS	NINGUNO
ALUMINIO ANODIZADO Y PULIDO	FROTAR CON SOLVENTE ELIMINADOR DE GRASAS	DOW CORNING @ 1200
ACERO AL CARBON INOXIDABLE DETERIORADO	FROTAR CON SOLVENTE ELIMINADOR DE GRASAS	DOW CORNING @ 1200
PLÁSTICO TALES COMO ACRILICO POLICARBONATO, PVC	FROTAR CON SOLVENTE ELIMINADOR DE GRASAS	DOW CORNING @ 1200

Las superficies deberán estar en buen estado, limpias, secas, libres de polvo, suciedad, grasas y otros materiales que pudieran impedir la adherencia. En la tabla 3.4 se observan los datos de resistencia de los selladores de silicón de efectos de intemperie.

Tabla 3.4. Datos que demuestran la resistencia de los selladores de silicón

<b>Propiedades Mecánicas</b>	<b>Tiempo de exposición a la intemperie</b>			
	1 año	2 años	3 años	4 años
Dureza puntos de cambio	+3 a -6	+2 a -6	+3 a -6	+7
Resistencia a la tensión porcentaje de cambio	+8 a -25	+4 a -22	+22 a -27	-31
Alargamiento, porcentaje de cambio	0 a -30	+4 a -28	+14 a -34	-55

### 3.2 Montaje de los colectores

Los colectores solares pueden integrarse arquitectónicamente en las cubiertas de los edificios, formando así parte de ellos, o bien pueden montarse sobre estructuras metálicas en terrazas o suelos; siempre teniendo en cuenta que debe mantenerse la inclinación apropiada para captar al máximo la radiación solar. Algunos soportes disponen de mecanismos que permiten variar la altura en invierno y en verano, para obtener el máximo rendimiento, sin embargo el ajuste medio también da buenos resultados.

A menudo una instalación está compuesta por más de un captador solar. Los captadores deben montarse orientados al sur, con una desviación máxima recomendable de  $\pm 40^\circ$ , y con una inclinación respecto al plano horizontal que cambia según la época del año en  $\pm 10^\circ$  según la latitud:

- En verano, la inclinación es: latitud  $-10^\circ$ .
- En invierno, la inclinación es: latitud  $+ 10^\circ$

Para instalaciones que van a estar funcionales durante todo el año, se forma como valor de la inclinación el mismo de la latitud o también el valor de la inclinación en invierno. Los tornillos de sujeción y otros accesorios deben resistir esfuerzos mecánicos superiores a 2500 N; ser inoxidable e incorporar arandelas plásticas para evitar corrosiones galvánicas. El tipo de anclaje se hará en función de las fuerzas del viento que deba soportar. La fuerza del viento sobre una superficie es:

$$F = P * S * \text{sen}^2 \alpha \quad (3.1)$$

Donde:

$F$  = Peso para contrarrestar la fuerza del viento

$$P = \text{Carga del viento, en } \frac{kg}{m^2}$$

$S = \text{Superficie colector, en } m^2$

$\text{sen}^2 \alpha = \text{seno del ángulo de inclinación}$

Las estructuras prefabricadas, con un diseño normalizado y galvanizados en caliente, soportan bien las condiciones ambientales. Durante el proceso de montaje de estas estructuras, no deben realizarse soldaduras que eliminan la protección del galvanizado.

### 3.3 Balance de energía en un colector solar plano

El colector solar tiene una placa absorbidora formada por aletas de cobre soldadas a tubos de cobre proporcionando una óptima transferencia de calor entre aleta, tubo y resistencia a los esfuerzos térmicos (figura 3.17).

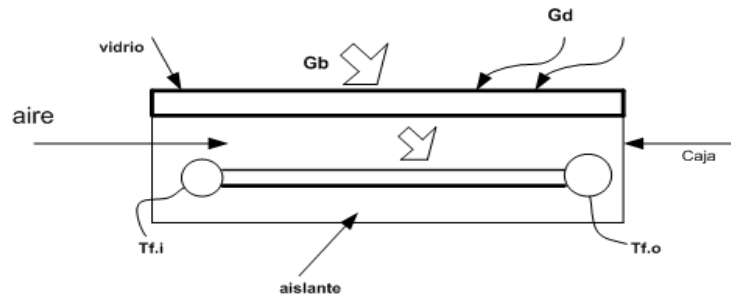


Figura 3. 17. Vista longitudinal de un colector solar plano

En un colector solar, la transferencia de energía se realiza desde una fuente distante de energía radiante a un fluido. Se debe considerar que el flujo de la radiación es variable en el tiempo y sin una concentración óptica. El flujo de energía proviene del intervalo de longitud de onda entre 0.3 y 3  $\mu\text{m}$ . En estado estacionario, sin acumulación de energía, un balance de energía se realiza entre la energía ganada y las pérdidas térmicas ocurridas en el colector que se pueden expresar por medio de la ecuación siguiente:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_L \quad (3.2)$$

Donde  $Q_u$  es el calor útil que se transfiere al fluido de trabajo en Watts,  $Q_{abs}$  es el calor total incidente absorbido por unidad de tiempo en el colector,  $Q_L$  son las pérdidas de calor hacia los alrededores por conducción, convección y radiación en watts. El calor total absorbido es igual al calor incidente menos las pérdidas ópticas del sistema cubierta - placa, es decir:

$$Q_{abs} = G_T A_c - \{G_T A_c (1 - \{\tau \alpha\})\} = G_T A_c \{\tau \alpha\} \quad (3.3)$$

Donde  $G_T$  es la irradiancia total sobre la superficie,  $A_c$  es el área del colector y  $\{\tau \alpha\}$  es el producto transmitancia del vidrio - absorptancia de la placa. El calor útil se define mediante la siguiente ecuación:

$$Q_u = m \cdot C_p (T_{f,o} - T_{fi}) \quad (3.4)$$

Donde  $m \cdot C_p$  es la capacidad calorífica del fluido de trabajo y  $(T_{f,o} - T_{fi})$  es la diferencia de temperaturas del fluido a la entrada y a la salida del tubo. Las pérdidas térmicas desde el colector hacia los alrededores por conducción, convección y radiación pueden englobarse en el cociente global de transferencia de calor  $UL$ , multiplicado por la diferencia entre la temperatura media de la placa absorbidora  $T_{PM}$  y la temperatura ambiente  $T_a$ .

$$Q_L = UL * A_c (T_{PM} - T_a) \quad (3.5)$$

La radiación solar absorbida por la placa del colector por unidad de área  $S$ , es igual a la radiación solar total incidente menos las pérdidas ópticas que tiene la radiación a su paso por el colector antes de llegar a la placa absorbidora, entonces:

$$S = GT * (\tau \alpha)_e \quad (3.6)$$

La sección transversal de un colector solar plano y las diversas reflexiones que tiene la radiación a su paso por las cubiertas y en la misma placa absorbidora del colector solar, es absorbida por la placa.

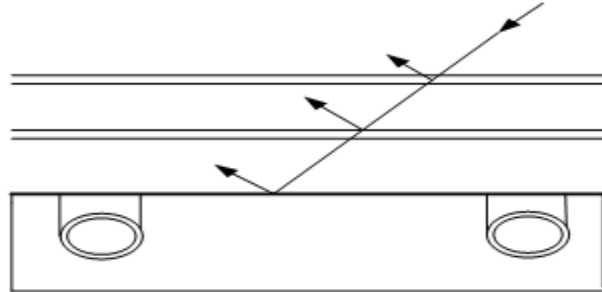


Figura 3. 18. Sección de una placa absorbidora entre los dos tubos

Entonces, en estado estacionario, el calor útil a la salida de un colector de área  $A_C$  es la diferencia entre la energía absorbida y las pérdidas térmicas. Sustituyendo la ecuación 3.2, 3.5 y 3.4 en la ecuación 3.1, el calor útil se expresa como:

$$Q_U = A_C [S - U_L (T_{PM} - T_a)] \quad (3.7)$$

El funcionamiento de un colector solar puede evaluarse conociendo su eficiencia instantánea, que se define como la relación entre el calor útil y la energía solar total incidente sobre el colector, para un mismo periodo de tiempo:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_C (G_b + G_d)} \quad (3.8)$$

### Distribución de temperatura en un colector solar plano

Para la distribución de temperatura en una placa absorbidora formada por aletas, se considera que la menor temperatura en la aleta debe ser en las cercanías del tubo y la temperatura en el extremo de la aleta, justo a la mitad de la distancia entre los tubos debe ser mayor (figura 3.19). La temperatura encima de los tubos debe ser casi uniforme debido a la presencia del tubo y a la unión con la placa.

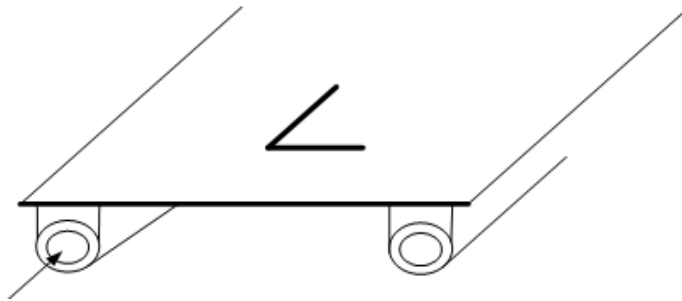


Figura 3. 19. Sección de una placa absorbidora entre dos tubos

Las consideraciones en el modelo del perfil de temperatura para la placa absorbidora de un colector solar y del coeficiente global de pérdidas totales, se enumeran a continuación:

1. El perfil de temperaturas es en estado estacionario.
2. Los cabezales de entrada proveen un flujo uniforme a los tubos.
3. El flujo de calor a través de la cubierta y el fondo del colector es unidimensional.
4. La caída de temperatura a través de la cubierta es despreciable.
5. Las cubiertas son opacas a la radiación infrarroja (la radiación de onda larga no salen a través de la cubierta, efecto invernadero)
6. El cielo puede ser considerado un cuerpo negro para la radiación de longitud de onda larga emitida hacia éste, con una temperatura de cielo equivalente.
7. El gradiente de temperatura en la dirección del flujo y entre los tubos puede tratarse de forma independiente (Independencia de dirección).
8. Las propiedades son independientes de la temperatura.
9. El sumidero de calor para las pérdidas por la parte superior e inferior del colector se considera a igual temperatura.
10. El efecto del polvo y las sombras son despreciables.

### **Coefficiente total de pérdidas de calor del colector**

A una temperatura media de placa  $T_p$ , la energía absorbida por la placa  $S$ , se distribuye entre la energía útil ganada y las pérdidas térmicas por la parte superior, inferior y lados del colector. Las pérdidas térmicas del sistema definidas por la ecuación 3.5, se representan por el coeficiente global de transferencia de calor  $UL$ .

Para evaluar el coeficiente total de pérdidas de calor  $UL$ , se considera la contribución de los términos que representan cada una de las pérdidas de calor al coeficiente total de pérdidas de calor de manera que puedan analizarse por separado. Estas pérdidas se representan en la figura 3.20 como una red térmica de resistencias para un colector de placa plana con una sola cubierta. Asumiendo que todas las pérdidas de calor ocurren al mismo sumidero de temperatura, la temperatura ambiente  $T_a$ , el coeficiente total de pérdidas del colector  $UL$ , se puede expresar como la suma de los inversos de las resistencias totales por la parte superior  $U_t$ , inferior  $U_b$  y por los lados del colector  $U_e$ .

$$UL = U_t + U_b + U_e \quad (3.9)$$

### **Coefficiente Total de Pérdidas Superiores**

Las pérdidas térmicas totales por la parte superior del colector son la suma de las pérdidas por convección y por radiación desde la placa del colector hacia los alrededores.

$$Q_{term, sup} = A_C U_t (T_p - T_a) \quad (3.10)$$

En estado estacionario, la energía transferida entre la placa a una temperatura de placa  $T_p$  y la cubierta a  $T_c$  es igual a la energía perdida hacia los alrededores por la cubierta de arriba. Las pérdidas por la parte superior de la placa absorbidora por unidad de área, son iguales al calor transferido desde la placa absorbidora a la primera cubierta, esto es:



$$q_{sup} = h_{c,,p-c}(T_p - T_a) + \frac{\alpha (T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (3.11)$$

El primer término del lado derecho de la ecuación 3.11 corresponde a las pérdidas convectivas y el segundo a las radiativas. En la ecuación,  $h_{c,,p-c}$  es el coeficiente convectivo de transferencia de calor entre placas paralelas inclinadas. De la misma forma se puede definir un coeficiente de transferencia de calor por radiación, agrupando los términos de manera siguiente:

$$q_{p, sup} = (h_{c,,p-c} + h_{r,,p-c})(T_p - T_c) \quad (3.12)$$

Donde:

$$h_{r,,p-c} = \frac{\sigma (T_p + T_c)(T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (3.13)$$

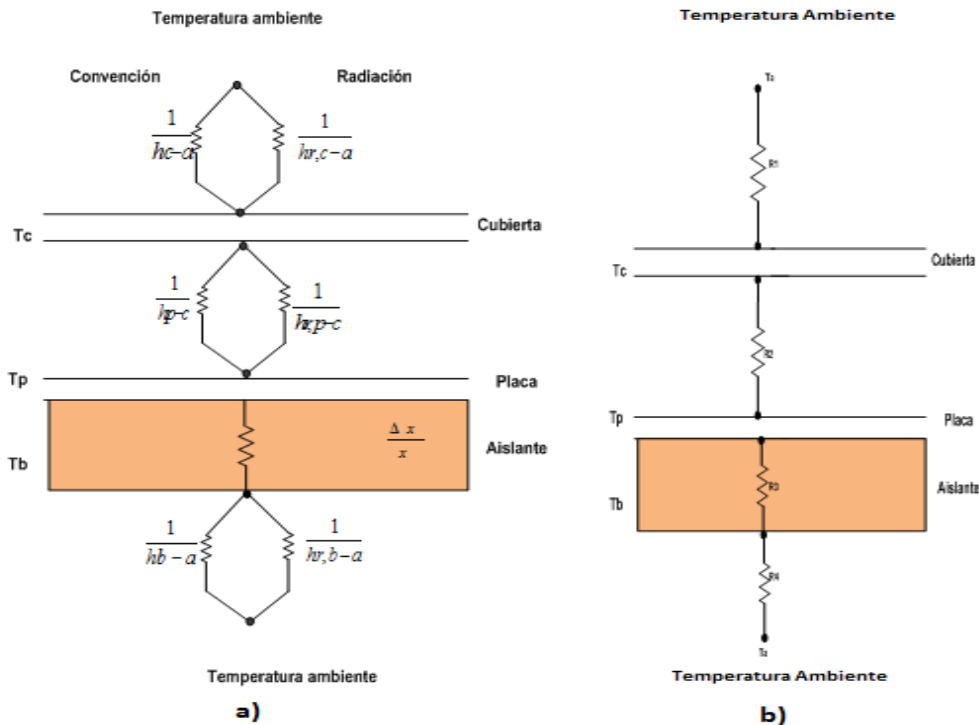


Figura 3. 20. Red térmica para un colector plano de una cubierta

- a) En términos de resistencias por conducción, convección y radiación.
- b) En términos de resistencias entre placas.

De acuerdo a la red térmica de la figura 3.20  $R_2$ , se expresa como:

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \quad (3.14)$$

La resistencia desde la cubierta de vidrio hacia los alrededores  $R_1$  está dada por:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,p-c}} \quad (3.15)$$

Donde  $h_w$  es el coeficiente convectivo que involucra la pérdida de calor por convección natural y forzada por acción del viento. La energía radiante que se intercambia con el cielo, permite definir un coeficiente radiativo usando una temperatura de cielo equivalente  $T_s$  con la temperatura ambiente como referencia:

$$h_{r,c-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c + T_s)(T_c^2 + T_s^2)(T_c - T_s)}{(T_c - T_a)} \quad (3.16)$$

Así, para un colector con una sola cubierta, el coeficiente de pérdidas superiores desde la placa al ambiente es:

$$U_T = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (3.17)$$

El proceso para estimar el coeficiente de pérdidas superiores es un proceso iterativo. Primero se supone una temperatura de cubierta desconocida, de ahí se calculan los coeficientes convectivos y radiativos entre superficies paralelas, con esas estimaciones se calcula  $U_T$ . Las pérdidas de calor superiores son iguales al coeficiente de pérdidas superiores  $U_T$  por la diferencia total de temperaturas, y la energía intercambiada entre placas debe ser igual a las pérdidas totales de calor, de ahí un nuevo conjunto de temperaturas de cubierta puede calcularse por:

$$q_{p, sup} = q_{tem, sup} \quad (3.18)$$

$$(h_{c, p-c} + h_{r, p-c})(T_P - T_c) = U_T(T_P - T_a)$$

Comenzando en la placa absorbadora, una nueva temperatura para la primera cubierta se calcula y se usa para calcular la temperatura de una segunda cubierta, si la hubiera. Para superficies planas adyacentes la temperatura de la superficie  $j$  se puede expresar en términos de la temperatura de la anterior  $i$ , como:

$$T_j = T_i - \frac{U_T(T_P - T_a)}{h_{c, i-j} + h_{r, i-j}} \quad (3.19)$$

### **Coefficiente de pérdidas inferiores y de borde**

Las pérdidas de energía por la parte inferior del colector se representan por las resistencias  $R_3$  y  $R_4$  de la figura 3.20, donde  $R_3$  es la resistencia al flujo de calor por el aislante y  $R_4$  la resistencia por convección y radiación de la parte de abajo al ambiente. Debido al aislante,  $R_4$  usualmente es muy pequeña y no se considera. Entonces el coeficiente de pérdidas por la parte inferior  $U_b$  es sólo la parte debida a la conducción de calor:

$$U_b = \frac{1}{R_3} = \frac{k}{L} \quad (3.20)$$

Donde  $k$  y  $L$  son la conductividad térmica y el espesor del aislante, respectivamente. Las pérdidas de borde son estimadas asumiendo un flujo de calor hacia los lados en una dimensión alrededor del perímetro del colector. Las pérdidas a través del borde hacen referencia al área del colector. El coeficiente de pérdidas de borde, basado en el área del colector  $A_c$ , es:

$$U_e = \frac{k}{L} \frac{P G_c}{A_c} \quad (3.21)$$

Donde:

$P$ = perímetro exterior del colector

$G_c$ = altura de la caja del colector

$L$ = espesor del aislante por los lados del colector

$k$ = conductividad térmica del aislante

La forma de calcular  $U_L$  supone muchas consideraciones que en la práctica no se cumplen como suponer una temperatura media de placa absorbidora fija, además de que la temperatura de entrada y salida del fluido son muy diferentes y cambian con el tiempo. Existen también otras variables que cambian con el tiempo como son la radiación solar y la temperatura ambiente.

### Perfil de temperatura en la aleta del colector solar

En el modelo de un colector solar plano se involucra un balance de energía en estado estacionario considerando una muy baja capacidad de almacenamiento y muy alta capacidad conductiva del cobre, además, se asume que arriba de la unión entre tubo y aleta se encuentra a la temperatura local  $T_b$  (figura 3.21).

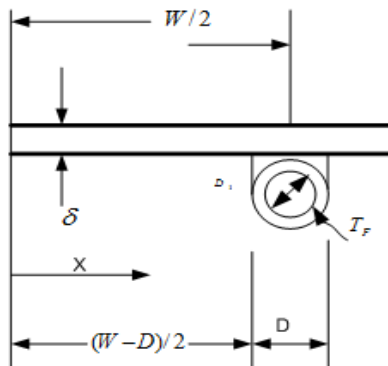


Figura 3. 21. Dimensiones de aleta y tubo

Un balance de energía en el elemento de volumen produce:

$$q_x [x^{-q_x}]_{x+\Delta x} = S\Delta x - U_L \Delta x (T - T_a) \quad (3.22)$$

Donde  $S$  está definida por la ecuación 3.6. Sustituyendo en la ecuación 3.22 la ley de Fourier de la conducción de calor expresada en la forma  $q_x = -k \left(\frac{dT}{dx}\right)$ ; dividiendo por  $\Delta x$ ; y aplicando el límite cuando  $\Delta x$  tiende a cero, se obtiene:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left\{ T - T_a - \frac{S}{U_L} \right\} \quad (3.23)$$

Las condiciones de frontera necesarias para resolver esta ecuación diferencial ordinaria de segundo orden son la condición de simetría a lo largo de la línea central representada por el tubo y la temperatura  $T_b$  conocida:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad (3.24 a)$$

$$T \Big|_{x=\frac{W-D}{2}} = T_b \quad (3.24 b)$$

La ecuación 3.23 y sus condiciones de frontera dadas por las ecuaciones 3.24 a y 3.24 b se pueden describir definiendo una nueva variable:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (3.25)$$

La ecuación 3.24 con el cambio de variable dado por la ecuación 3.25 queda como sigue:

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} - m^2 \psi = 0 \quad (3.26)$$

Con  $\psi = T - T_a - \frac{S}{U_L}$

La solución para la ecuación 3.23 y sus condiciones de frontera es:

$$\frac{T - T_a - S / U_L}{T_a - T_b - S / U_L} = \frac{\cos h mx}{\cos h mx (W - D) / 2} \quad (3.27)$$

El calor conducido hacia el tubo por unidad de longitud en la dirección del flujo se encuentra aplicando la ley de Fourier, evaluada en la base de la aleta. La energía conducida por ambos lados hacia el tubo es:

$$q'_{aleta} = (W - D) [S - U_L (T_b - T_a)] \frac{\tanh m \frac{(W-D)}{2}}{m \frac{(W-D)}{2}} \quad (3.28)$$

Reescribiendo la ecuación 3.27, se tiene:

$$q'_{aleta} = (W - D) F [S - U_L (T_b - T_a)] \quad (3.29)$$

Donde  $F$  es el factor de eficiencia de la aleta:

$$F = \frac{\tanh \left[ m \frac{(W-D)}{2} \right]}{m \frac{(W-D)}{2}} \quad (3.30)$$

El calor ganado arriba del tubo es:

$$q'_{tubo} = D [S - U_L (T_b - T_a)] \quad (3.31)$$

El calor transmitido al tubo por la aleta y el calor ganado por la parte superior del tubo es la suma de la ecuación 3.29 y 3.31:

$$q'_U = [(W - D) F + D] [S - U_L (T_b - T_a)] \quad (3.32)$$

### Factor de eficiencia del colector

La energía ganada por unidad de longitud descrita en la ecuación 3.32 debe ser transferida al fluido de trabajo; sin embargo, antes de llegar al fluido se enfrenta con resistencias al flujo de calor como son la resistencia por parte de la soldadura y la resistencia en la interfase fluido-tubo. La energía ganada se puede expresar en términos de estas dos resistencias como:

$$q'_U = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_{fi}\pi D_i} + \frac{1}{C_b}} \quad (3.33)$$

Donde  $D_i$  es el diámetro interior del tubo,  $h_{fi}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección en la interfase pared del tubo-fluido y  $C_b$  es la conductancia de la soldadura. Para expresar la energía ganada en términos de la temperatura local del fluido, se despeja  $T_b$  de la ecuación 3.33 y se sustituye en la ecuación 3.32, dando como resultado:

$$q'_U = WF' [S - U_L (T_f - T_a)] \quad (3.34)$$

Donde el factor de eficiencia del colector  $F''$  es:

$$F'' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[ \frac{1}{U_L [D + (W-D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (3.35)$$

### Distribución de temperatura en dirección del flujo

Haciendo un balance en un elemento de fluido en la dirección del flujo y desarrollando una solución que exprese la evolución longitudinal de la temperatura del fluido, obtenemos:

$$\frac{T_f - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}} = \exp(-U_L nWF' \frac{y}{m' C_p}) \quad (3.36)$$

Donde  $T_{fi}$  es la temperatura de entrada del fluido,  $T_a$  es la temperatura ambiente,  $m'$  es el flujo másico de cada tubo y  $n$  es el número de tubos paralelos. Con una longitud  $L$  en la dirección del flujo y una temperatura de salida del fluido  $T_{fo}$ , y siendo  $nWL$  el área del colector, la ecuación 3.36 se convierte en:

$$\frac{T_{fo} - T_a - \frac{S}{U_L}}{T_{fi} - T_a - \frac{S}{U_L}} = \exp(-A_C U_L \frac{F'}{m' C_p}) \quad (3.37)$$

El factor de remoción de calor se describe como:

$$F_R = \frac{m' C_p}{A_C U_L} \left[ 1 - \exp(-A_C U_L \frac{F'}{m' C_p}) \right] \quad (3.38)$$

Y el calor útil que toma en cuenta variables, como son la temperatura de entrada del fluido  $T_i$ , las pérdidas totales,  $U_L$  entre otros es:

$$Q_U = A_C F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (3.39)$$



# CAPÍTULO IV

## SISTEMA DE CONTROL

### 4.1 Motor de corriente directa

El uso de motores de CC (corriente continua) está muy extendido, hoy en día se pueden encontrar en cualquier dispositivo electromecánico. Controlar la posición y la velocidad de estos motores es muy sencillo convirtiéndose en una buena opción a la hora de crear aplicaciones de automatización y control.

Los motores de corriente continua simplemente necesitan ser conectados a una fuente de corriente continua o una batería compatible para que se pongan en marcha. Es posible modificar la velocidad bajando o subiendo el voltaje de alimentación.

### Puente en H

Es conocido que el sentido de giro de un motor de corriente continúa depende de la polaridad que se aplica a sus terminales, en consecuencia para cambiar el giro es necesario intercambiar las terminales del motor o bien cambiar la polaridad de la alimentación.

La forma más sencilla de controlar un motor de corriente continua de baja potencia, en velocidad y sentido de giro, es mediante la conmutación electrónica de unos circuitos realizados básicamente con transistores que reciben el nombre de Puente en H, como se describe en la figura siguiente.

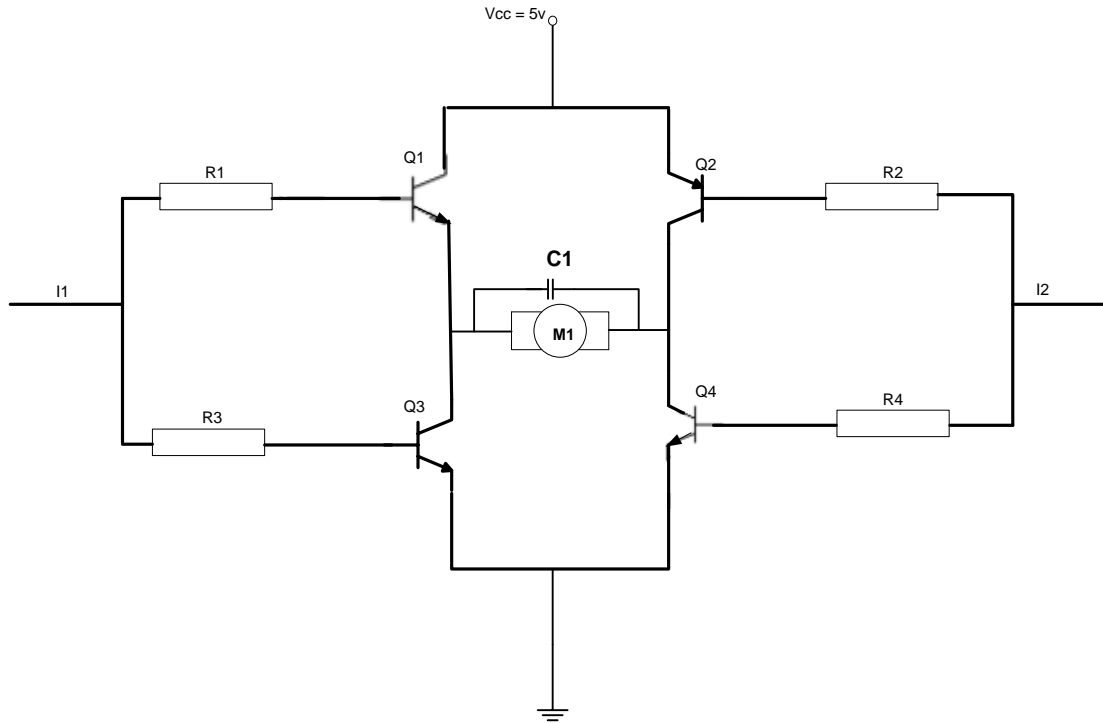


Figura 4. 1. Puente en H con transistores

Este circuito está formado por cuatro transistores que trabajan en conmutación y se comportan como interruptores controlados por la señal que les llega a las entradas I1 e I2.

Su funcionamiento es el siguiente:

- Cuando se activa la entrada I1 a nivel alto y la entrada I2 a nivel bajo (figura 4.2), los transistores Q3 y Q2 (NPN y PNP) entran en saturación simultáneamente mientras que Q1 y Q4 están en corte por ser de signo contrario (PNP y NPN respectivamente). En estas condiciones el motor gira en un sentido contrario a las agujas del reloj.

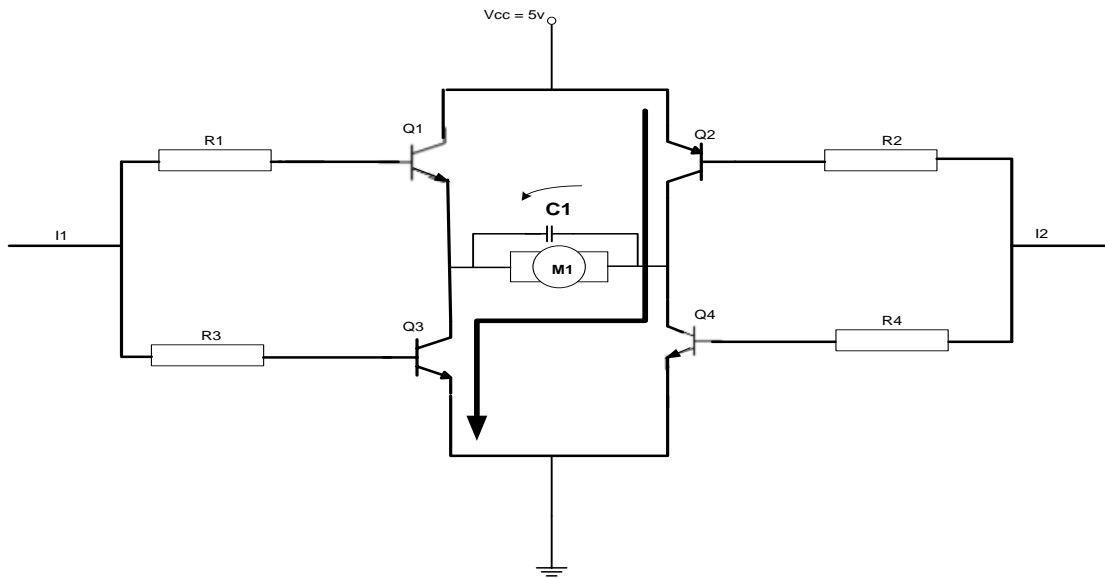


Figura 4. 2. Funcionamiento con I1 a nivel alto e I2 a nivel bajo

- Cuando se invierten las señales de entrada, es decir, I1 a nivel bajo e I2 a nivel alto, los transistores que se saturan son Q2 y Q3, mientras que los que entran en estado de corte son Q1 y Q4, (figura 4.3). Esto hace que el motor gire en sentido contrario.

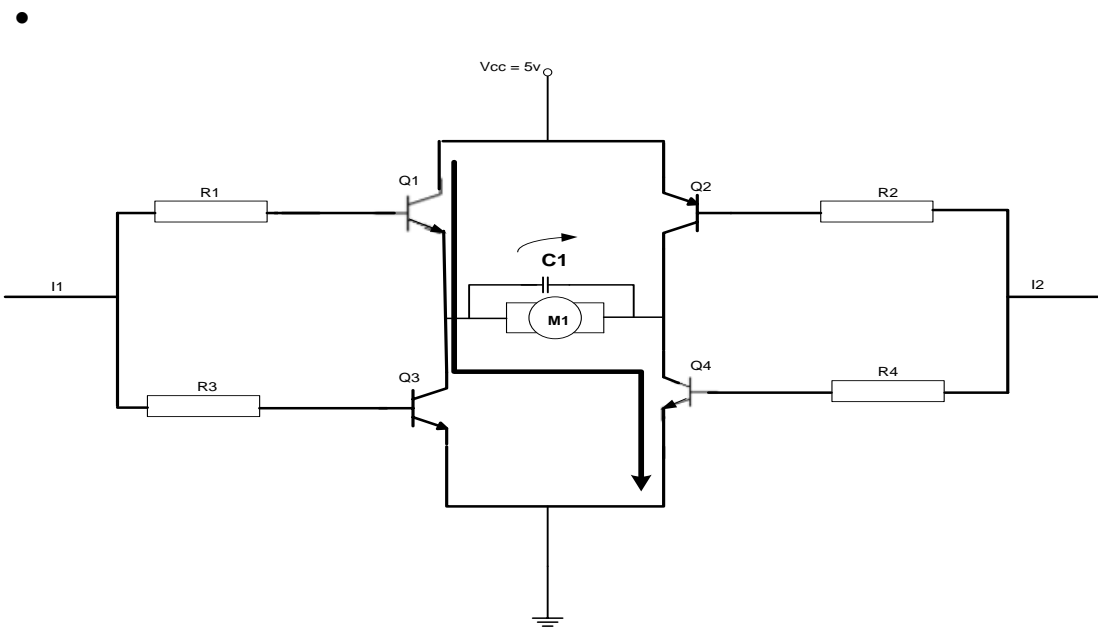


Figura 4. 3. Funcionamiento con I1 a nivel bajo e I2 a nivel alto

En la figura siguiente se muestra un puente H comercial, formado por un solo integrado y conectado con los componentes necesarios para realizar el cambio de giro, de acuerdo al programa establecido por el usuario.

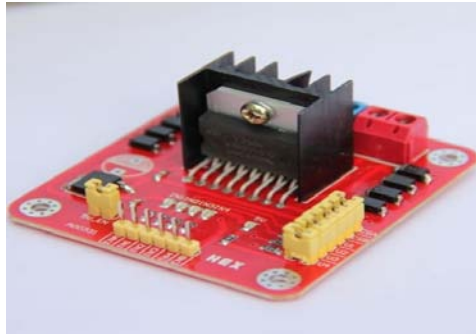


Figura 4. 4. Puente H que se ocupa para el movimiento de los motores

## 4.2 Microcontrolador Arduino

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios. El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque que es ejecutado en la placa; se puede programar con el mismo IDE de Arduino y realizar programas que compilen sin cambios en las dos plataformas (figura 4.5).

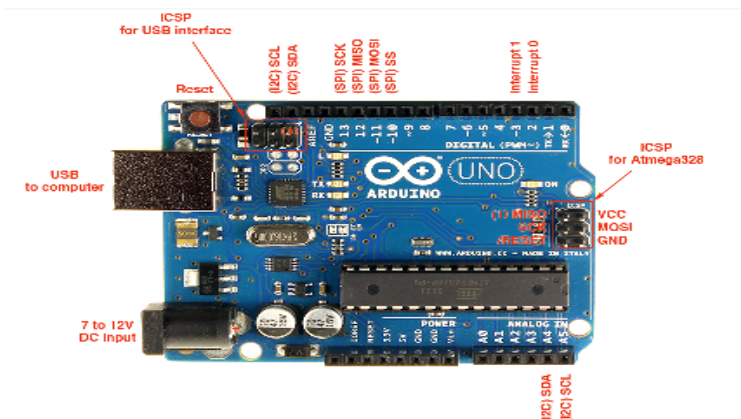


Figura 4. 5. Microcontrolador Arduino

### 4.3 Potenciómetro

Potenciómetro es un resistor cuyo valor de resistencia es variable. De esta manera, indirectamente, es posible controlar la intensidad de corriente que fluye por un circuito.



Figura 4. 6. Potenciómetro

### 4.4 Controlador PID

Un regulador o controlador PID (proporcional, integral, derivativo) es un mecanismo de control retroalimentado en bucle cerrado ampliamente usado en sistemas de control industrial. Un PID calcula el error como la diferencia entre el valor actual del sistema y el valor al que se desea llegar. Además intenta minimizar el error mediante el ajuste de las entradas del proceso (figura 4.7).

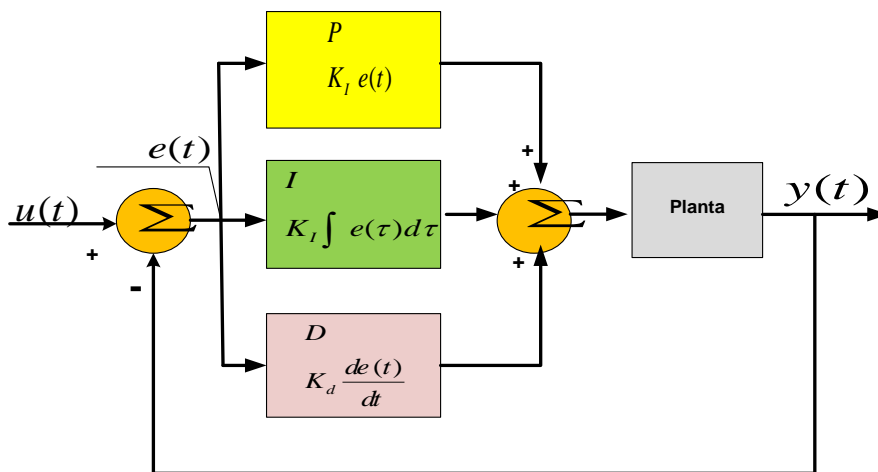


Figura 4. 7. Diagrama de bloques de un Regulador PID

En el cálculo del regulador PID intervienen tres parámetros distintos. Estos valores se pueden interpretar en función del tiempo. El proporcional  $P$  depende del error actual, el integral  $I$  depende de la suma de todos los errores pasados, y el

derivativo  $D$  es la predicción de errores futuros, basándose en la tasa de cambio actual. La suma ponderada de los tres términos permite ajustar un proceso mediante un elemento de control, por ejemplo, la velocidad que debe alcanzar un motor de corriente continua.

$$U = P + I + D \quad (4.1)$$

Mediante el ajuste de estas tres constantes en el algoritmo de control PID, el regulador es capaz de proporcionar acciones de control específicas a los requerimientos de un sistema. La respuesta del regulador se puede describir como la capacidad de respuesta ante un error, el grado en que el regulador llega más allá del punto de ajuste, y la oscilación del sistema. El ajuste de las constantes se logra mediante el análisis del sistema, se puede llegar a ajustar el tiempo de respuesta, que significa cuánto tiempo tarda el regulador en llevar al sistema a cierto estado. Es posible ajustar el sistema, para reducir el error de estado estacionario y minimizar las sobreoscilaciones alrededor de la referencia o estado deseado.

Sin embargo, este ajuste no es perfecto, ya que si se quiere una respuesta muy rápida las oscilaciones son inevitables debido a que el sistema no puede responder correctamente en tan poco tiempo, un ejemplo de esto, es si se desea que un motor alcance una determinada posición y que debido a la inercia se pase de la referencia y oscile por arriba y por debajo, hasta llegar a la posición determinada por la referencia establecida. Aquí se observa claramente un efecto negativo, ya que por incrementar el tiempo de respuesta se ha provocado una sobreoscilación y como consecuencia se ha ralentizado la respuesta.

Es importante mencionar que el uso de un regulador PID no garantiza un control óptimo, ni estabilidad al sistema. Hay sistemas que son inestables; un sistema es inestable si el valor regulado oscila indefinidamente, o sí dicho valor diverge sin límite del estado estable.

Algunas aplicaciones solo requieren el uso de uno o dos parámetros para proporcionar un control apropiado al sistema; para no usar un parámetro simplemente hay que colocar la ganancia del parámetro a cero. Dependiendo de los parámetros activos, los reguladores se pueden llamar PI, PD, P o I.

Los reguladores PI son muy comunes ya que la acción derivativa D es sensible al ruido. Por otro lado, la ausencia de la acción integral puede evitar que el sistema llegue al valor deseado.

### **Término Proporcional**

El término proporcional modifica la salida proporcionalmente con el error actual. La respuesta proporcional se puede ajustar multiplicando el error por una constante  $K_p$ , conocida como ganancia proporcional.

$$P = K_p e_t \quad (4.2)$$

Donde  $u$  es la salida y  $e$  el error en un instante de tiempo, de este modo cuanto más grande sea el error más rápida será la respuesta, y conforme el error se reduzca, la respuesta será más pequeña, hasta que finalmente el error sea cero y la respuesta nula, ya que el valor deseado es el mismo que el valor actual. Un controlador proporcional no siempre alcanzara su valor objetivo, conservando un error de estado estacionario. Para eliminar este error hay que usar el término integral.

### **Término Integral**

El término integral es proporcional a la magnitud del error y a la duración del error, es decir, la suma de todos los errores en cada instante de tiempo o como su nombre indica la integración de los errores. Esta suma compensa la diferencia que deberá haber sido corregida anteriormente. El error acumulado se multiplica por la ganancia integral  $K_I$  que indicara la cantidad de acción integral respecto de toda la acción de control.

$$I = K_I \int_0^t e_\tau \quad (4.3)$$

Al usar el integral junto al proporcional, se acelera el movimiento del sistema llegando antes al valor deseado, es decir, menor tiempo de respuesta. Además elimina el error estacionario que se produce al usar un regulador proporcional. Sin embargo, el término integral toma en cuenta los errores acumulados en el pasado y puede hacer que el valor actual sobrepase el valor deseado, lo cual creará un error en el otro sentido, dando como resultado oscilaciones alrededor del valor deseado.

### **Término Derivativo**

El término derivativo calcula la variación del error mediante la pendiente del error en cada instante de tiempo, es decir, la primera derivada con respecto al tiempo, y multiplica esa variación del error con la ganancia derivativa  $K_d$ , la cual indica la cantidad de acción derivativa respecto de toda la acción de control.

$$D = K_d \frac{d}{dt} e_{(t)} \quad (4.4)$$

El derivativo ralentiza la tasa de cambio de la salida del regulador y cuanto más cerca esta del valor deseado, se hace aún más lento. Por lo tanto, el uso del derivativo sirve para disminuir las oscilaciones producidas por el control integral y mejorar la estabilidad del proceso de regulación. Uno de los inconvenientes es que al realizar la derivada, el ruido es amplificado y hace al regulador más sensible a las interferencias, llevando al sistema a la inestabilidad en el peor de los casos.

### **Ecuación del regulador**

Los términos proporcional, integral y derivativo son sumandos para hallar la salida del regulador PID, sabiendo que  $u(t)$  es tal salida, la ecuación que define al algoritmo es la siguiente:



$$u(t) = K_p e_t + K_I \int_0^t e_\tau d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (4.5)$$

Hay que tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La ganancia proporcional  $K_p$ . Entre mayor es, más rápida es la respuesta, debido a que entre más grande es el error, más grande es la acción proporcional. Valores muy grandes pueden ocasionar oscilaciones o incluso la inestabilidad.
- La ganancia integral  $K_I$ . Valores grandes eliminan más rápidamente los errores estacionarios. Sin embargo, puede provocar mayor sobreoscilación.
- La ganancia derivativa  $K_d$ . Entre más grande es, más se reduce la sobreoscilación, pero ralentizan el tiempo de respuesta y pueden llevar al sistema a la inestabilidad, debido a la amplificación del ruido en el cálculo diferencial del error.

### **Ecuación del regulador discreta**

Una computadora solo es capaz de procesar valores discretos y finitos, así que para poder implementar el algoritmo de control de un regulador PID, es necesario discretizar la ecuación del regulador PID, una vez discretizada, se calcula para cada uno de los instantes de tiempo muestreados.

Para cada instante de tiempo se vuelve a calcular una nueva acción de control utilizando la nueva salida del sistema, esto permitirá al sistema avanzar hacia el estado deseado, marcado por la referencia con cada nuevo cálculo. La ecuación discreta del regulador para poder ser implementada en una computadora se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_I T_s \sum_{k=0}^t e_k + k_d \frac{e(t) - e_{(t-1)}}{T_s} \quad (4.6)$$

# CAPÍTULO V

## DISEÑO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 5.1 Calentador solar plano

Se realizó el diseño de una forma simplificada (figura 5.1) con:

- Una placa de absorción de lámina negra
- Aislante de cartón corrugado
- Vidrio simple de 3mm

El resultado obtenido fue que su eficiencia era muy baja, con una temperatura de salida de 25° C. Por lo que se optó, por realizar una investigación para mejorar su eficiencia, con otro tipo de materiales.



Figura 5. 1. Primer diseño del calentador suave

### 5.2 Mejora de calentador solar

De acuerdo a la investigación realizada se obtuvieron los siguientes resultados para el mejor aprovechamiento de la radiación solar.

## Tubería

Para la tubería se necesita un material que caliente rápidamente y que mantenga la temperatura y que sea fácil de manejar; los materiales que se pueden utilizar para la tubería son: cobre, PVC y galvanizado (figura 5.2). Para elegir el adecuado, se realizaron pruebas para saber cuál era el más eficiente.



Figura 5. 2. Tubos: galvanizado PVC y cobre

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- Se tomaron tres tubos de 25 cm y de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro con los tipos de material mencionados anteriormente.
- Se les colocó un tapón en un extremo.
- Se le agregó 25 ml de agua y se colocó el termómetro en el otro extremo.
- Se expusieron al sol alrededor de una hora.
- Anotando las lecturas de temperatura:
  - Cada minuto, hasta completar 10 minutos.
  - Después cada 10 minutos, hasta completar la hora.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultados de temperatura de tres tipos de materiales

Tiempo (min)	Tubo		
	Cobre °C	PVC °C	Galvanizado °C
0	24	24	24
1	26	26	25
2	28	29	27
3	28	30	27
4	28	30	28
5	29	30	28
10	29	30	27
20	30	32	28
30	33	30	27
40	29	29	27
50	29	29	26
60	29	25	26

En la gráfica de la figura 5.3, se observa que el cobre es el material que llega a una mayor temperatura y se mantuvo constante en su comportamiento. Por lo que se selecciono el tubo de cobre para realizar el calentador solar plano.

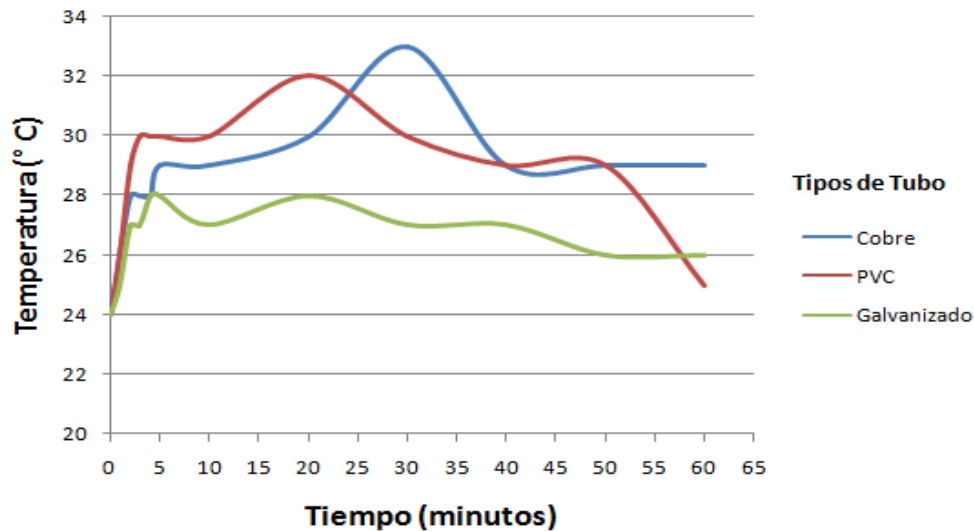


Figura 5. 3. Temperatura de tuberías

## Prueba de color

La prueba de color consiste en:

- Utilizar tres secciones de tubo (cobre) de la misma medida.
- Pintarlos de blanco, negro y sin color, respectivamente.
- Colocar un tapón en un extremo, llenarlos de agua y colocar el termómetro en el otro extremo.
- Exponerlos al sol y medir la temperatura durante 30 minutos.
- Realizar las mediciones:
  - Cada minuto, durante los primeros cinco minutos.
  - Después cada cinco minutos hasta completar 30 minutos.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Resultados de temperatura en tubo de diferentes colores

Tiempo (min)	TUBO DE COBRE PINTADO DE:		
	S/COLOR	BLANCO	NEGRO
	°C	°C	°C
1	30	29	27
2	31	29	28
3	31	29	29
4	31	29.5	30
5	32	30	31
6	32	30	32
7	32	30	33
8	32	30	34
9	33	30	35
10	33	31	36
15	34.5	31	39
20	35	32	40
30	35	32	43

En la gráfica de la figura 5.4, se observa que el tubo pintado de color negro obtuvo una mayor temperatura, en comparación con los restantes. También se

muestra como la temperatura del tubo pintado de color blanco, mantiene una temperatura constante en el tiempo transcurrido, mientras que el tubo sin aplicación de color se mantiene por arriba de la temperatura del tubo pintado de blanco. Por lo que se eligió el tubo pintado de color negro para realizar la prueba siguiente.

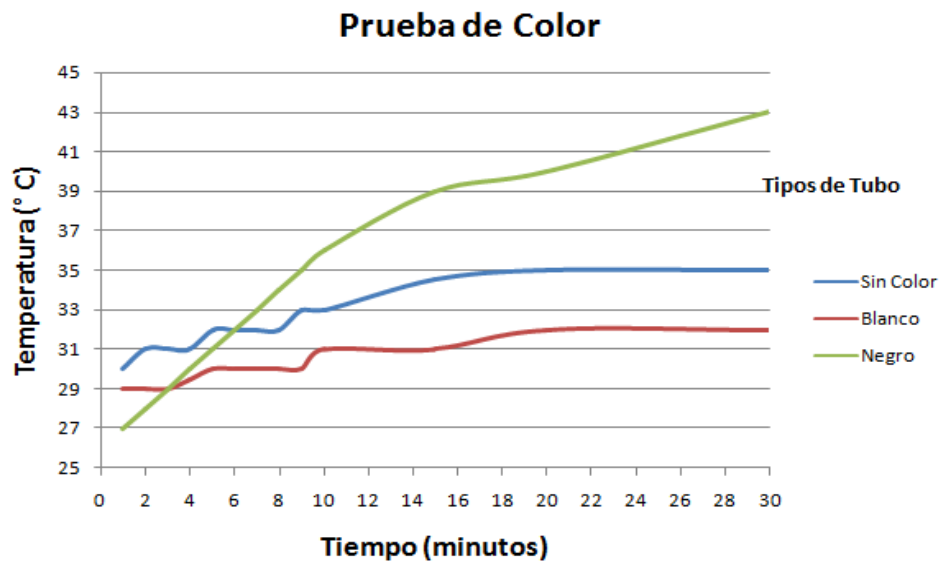


Figura 5. 4. Prueba de color

### Placa de absorción

La tercera prueba realizada consiste en:

- Fabricar tres cajas de madera rectangulares, a las que se les realizo un barreno de  $\frac{1}{4}$  de pulgada para colocar el termómetro.
- Se coloco una lámina negra, lámina normal galvanizada y sin lámina respectivamente. Y se incorpora el tubo de cobre de la prueba anterior (se usara un tubo para cada caja), ver figura 5.5.
- Se llenan los tubos con agua y se coloca el termómetro.
- Exponerlos al sol y medir la temperatura durante 60 minutos.
- Realizar las mediciones:
  - Cada minuto hasta llegar a los primeros diez minutos.
  - Posteriormente cada cinco minutos hasta completar la hora.

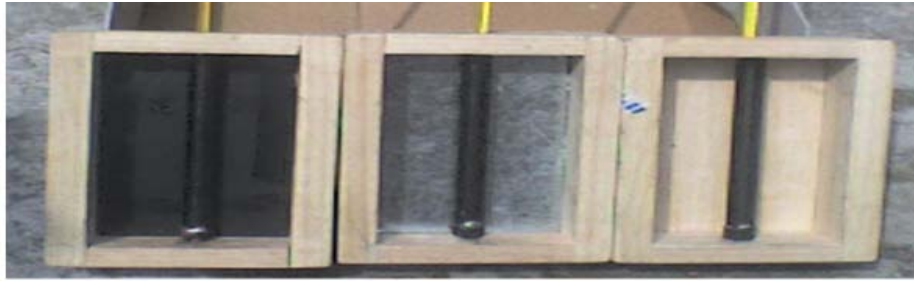


Figura 5. 5. Prueba de la placa de absorción con lámina negra, lámina normal y sin lámina

Los resultados que se obtuvieron se muestran en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Resultados de temperatura de tres láminas

Tiempo (min)	Temperatura °C		
	Sin lámina	Lámina Normal	Lámina negra
1	22	23	22
2	24	25	24
3	24.5	26	25
4	25	26	26
5	25	27	27
6	25.5	28	28
7	26	29	29
8	26	30	30
9	26.5	31	31
10	27	30	31
15	31.5	30	30.5
20	35	37	34
25	37	41	41
30	41	42	42
35	40	41	44
40	43	43	45
45	45	45	47
50	45	47	48
55	47	47	48
60	47	48	49

En la gráfica de la figura 5.6, se observa que la caja que contiene la lámina negra responde a una mayor temperatura en comparación con las otras dos cajas. Por lo cual, la lámina funciona como aleta que incrementa la transferencia de calor. Y se selecciono esta lámina para realizar la prueba siguiente.

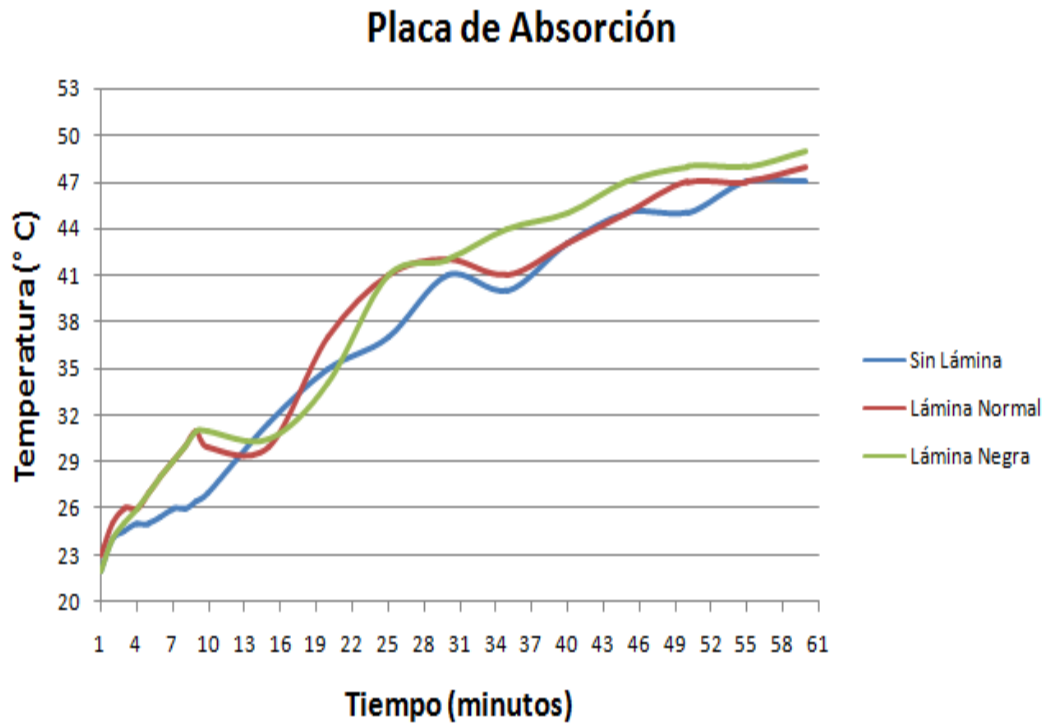


Figura 5. 6. Placa de absorción

### Caja con vidrio templado

La siguiente prueba consiste en colocar un vidrio templado sobre las cajas del experimento anterior. Nuevamente se realizó la medición de la temperatura del agua. Tomando cada minuto hasta completar diez minutos, posteriormente cada cinco minutos hasta completar la hora. Los resultados se observan en la tabla 5.4.



Tabla 5.4. Resultados de temperatura con vidrio templado

Tiempo (min)	Temperatura (° C)		
	Lámina negra	Lámina Normal	Sin lámina
1	30	29	28
2	31	30	29.5
3	35	33	31.5
4	37	35	34
5	40	37	36
6	42	38	37
7	43	39	38
8	45	41	40
9	46	42	41
10	48	44	42
15	60	54	52
20	62	56	54
25	66	61	59
30	70	64	62
35	73	67	64
40	73	68	65
45	73	68	65
50	72	67	63
55	73	69	65
60	74	70	66

La figura 5.7 muestra, que el mejor rendimiento de absorción de temperatura es la de lámina negra con ayuda del vidrio templado. Por lo que confirmamos la utilización de la lámina negra y el vidrio templado para un óptimo rendimiento.

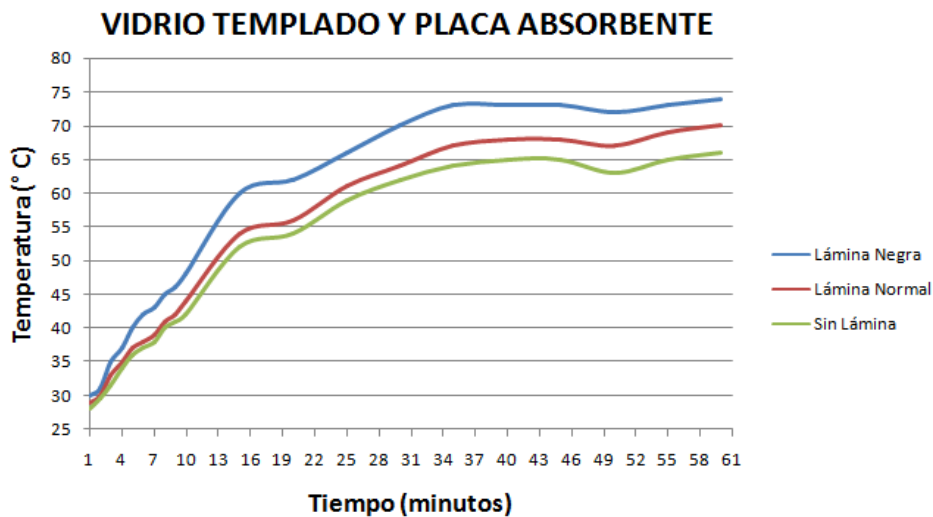


Figura 5. 7. Curva de la placa absorbente y vidrio templado

### Pruebas del colector

Para esta prueba se fabricaron rectángulos de unicel y vidrio templado de diferente grosor. Los cuales se colocaron en soportes universales: por la parte de abajo se colocó un foco de 100 w y en la parte superior se colocó un termómetro (figura 5.8).



Figura 5. 8. Pruebas del vidrio

Se tomó la temperatura de la siguiente manera durante dos horas:

- Lecturas cada minuto hasta completar diez minutos.
- Posteriormente, cada 10 minutos hasta completar una hora.
- Después cada media hora hasta completar las 2 horas.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 5.5. Donde la (A) significa que se utiliza vidrio normal y (B) significa la utilización de vidrio templado.

Tabla 5.5. Resultados de pruebas del colector

Vidrio mm	Tiempo min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	90	120	
(A) 2	Temperatura (°C)	22	23	23	23	24	24	24	25	25	25	25	26	27	27	27	27	27	27	
(B) 2		22	30	44	47	48	24	55	25	52	50	51	62	61	61	60	55	52	60	
(A) 4		22	23	25	25	26	24	26	25	26	26	26	26	28	28	29	30	28	29	29
(B)4		22	30	32	32	36	24	41	25	51	50	50	64	66	66	50	51	55	55	
(A) 6		22	23	23	23	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25
(B) 6		22	29	32	34	35	36	36	40	37	37	27	37	41	39	39	38	40	40	44

En la gráfica de la siguiente figura se observa que la utilización del vidrio templado de 2 y 4 mm, mejora el paso de la radiación solar, dando como resultado el aumento de temperatura debido al efecto invernadero. En el vidrio templado de 6 mm, no se observa una mejora debido al grosor que impide que los rayos solares penetren de manera efectiva.

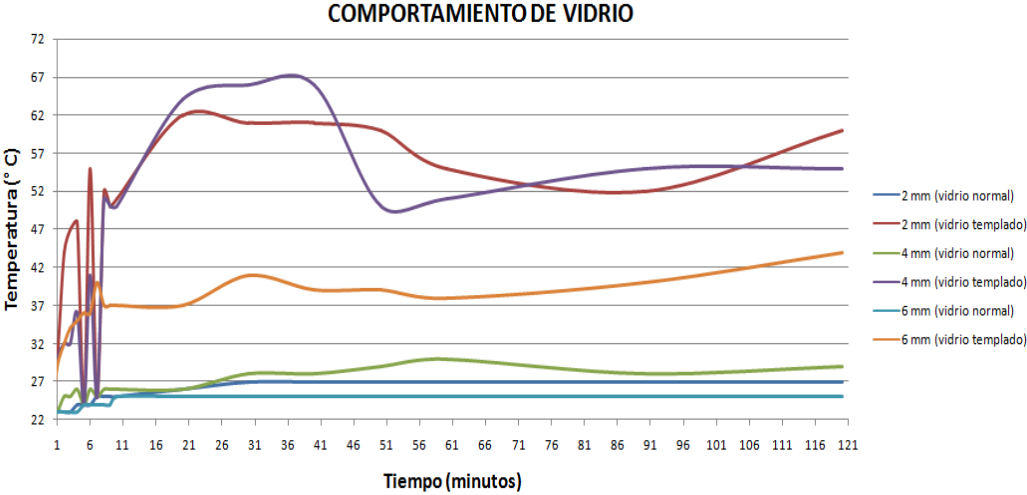


Figura 5. 9. Gráfica de vidrio

Como se observo anteriormente el vidrio normal deja pasar menos cantidad de calor que los demás (figura 5.9), por lo cual se utilizo un vidrio templado de 5 mm. La elección anterior fue elegida porque el vidrio templado comercial es de 6 mm, del cual, si se requiere uno de menor espesor el costo aumenta considerablemente debido al desgaste que se realiza en el mismo y por el tamaño de la caja, esto es, entre menor sea el tamaño del vidrio y menor el grosor el costo es mayor.

Las características del vidrio templado de 5 mm son las siguientes:

Porcentaje de Transmitancia de energía solar (onda corta)	Porcentaje de Transmitancia de energía solar (onda larga)	Índice de Refracción
87.5	2	1.51

## Pruebas de espesor de unigel

Esta prueba se realiza para seleccionar el grosor del unigel, con la finalidad de observar cual retiene de manera satisfactoria el calor. Consiste en colocar en un soporte de la placa universal el unigel. En la parte inferior se coloca un foco y en la superior un termómetro para hacer las mediciones de temperatura (figura 5.10).

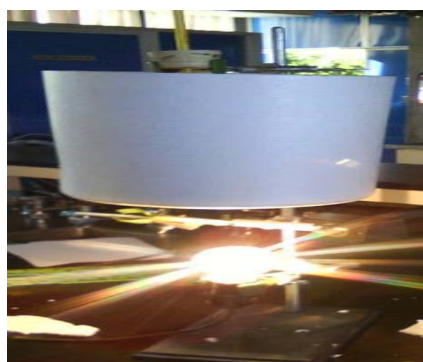


Figura 5. 10. Pruebas al unigel

Se tomó la temperatura de la siguiente manera durante dos horas:

- Lecturas cada minuto hasta completar diez minutos.
- Posteriormente, cada 10 minutos hasta completar una hora.
- Después cada media hora hasta completar las 2 horas.

Los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 5.6. Donde: A es utilización de vidrio normal y B con vidrio templado.

Tabla 5.6. Características del Unigel

Unigel mm	Min	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	90	120	
(A) 1	Temperatura (° C)	22	23	23	23	24	24	24	24	24	24	25	26	26	26	27	27	27	27	
(B) 1		22	30	32	33	36	42	53	57	64	70	68	68	72	69	69	70	68	69	
(A) 1.5		22	23	24	24	24	24	24	24	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
(B)1.5		22	30	33	36	42	46	56	64	70	69	69	70	64	65	70	66	69	70	
(A) 2		22	22	22	23	23	24	23	24	24	23	24	24	25	25	25	24	25	24	
(B) 2		22	29	31	34	40	44	52	59	67	69	66	70	68	69	70	70	69	70	

En la gráfica se observa que el unigel de 2 mm de espesor, se mantiene constante y no deja pasar el calor. Por lo sé utilizo este espesor para la realización de la presente tesis.

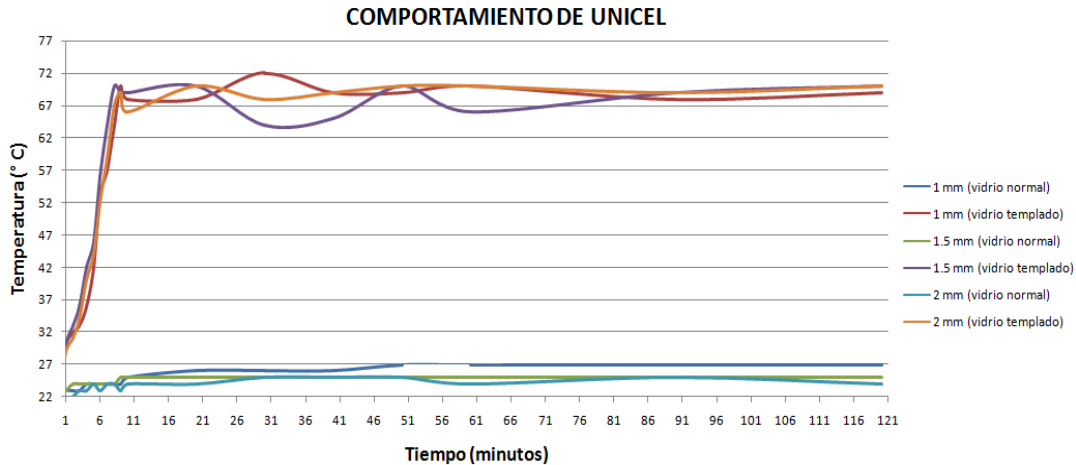


Figura 5. 11. Gráfico del Unigel

### 5.3 Construcción del calentador solar plano

La caja del colector mide 0.31 m de largo, 0.125 m de ancho y 0.06 m de profundidad, con un área de 0.66 m<sup>2</sup>. Como ya se había analizado anteriormente, se utilizó el tubo de cobre pintado de negro para transmitir el calor. El colector solar tiene una placa absorbidora formada por aletas de cobre soldadas a los tubos de cobre proporcionando una óptima transferencia de calor entre aleta, tubo y resistencia a los esfuerzos térmicos, además de colocar un sensor de temperatura Ds18b20 para medir la misma (figura 5.12).



Figura 5. 12. Aletas y sensor de temperatura

Después se coloca la placa de absorción de lámina negra que sirve para mejorar la transferencia de calor (figura 5.13), como se menciona anteriormente.



Figura 5. 13. Placa de absorción

Para la realización de la parte aislante se fabricó un sándwich de cartón corrugado pintado de negro (figura 5.14 a) y una lámina de unigel de 1.5 cm de espesor forrada con papel aluminio (figura 5.14 b). La función del papel disminuye la pérdida de calor por el dorso del colector.

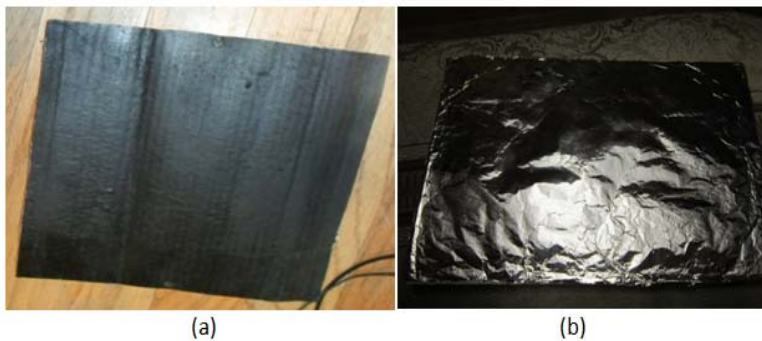


Figura 5. 14. (a) Absorbedor de calor, (b) Unigel forrado con papel aluminio

La figura 5.15, muestra como queda montado el vidrio templado colocado en el calentador, el vidrio templado es de 5 mm.



Figura 5. 15. Calentador solar plano

Por último, en la figura 5.16 se muestra como quedaron colocados los sensores de temperatura y presión del calentador solar.



Figura 5. 16. Medidores de presión y temperatura de entrada y salida

### 5.3.1 Especificaciones

El colector usado en la fase experimental, tiene una inclinación de  $20^{\circ}$  con una ubicación norte - sur. Con las siguientes características:

#### 1. Placa absorbedora

La placa absorbedora se forma con tres aletas de cobre, los tubos están colocados abajo de cada aleta.

Dimensiones de cada aleta:

- Largo: 15.4 cm
- Ancho: 4.0 cm
- Espesor de la Aleta: 0.31 mm

La película selectiva es una capa de cromo negro sobre una base de níquel claro, de gran selectividad, alta absortancia y baja emitancia.

- Absortancia = 0.95
- Emitancia = 0.12

## **2. Red de conductos**

Tubos de cobre soldados a los dos cabezales de alimentación.

- Diámetro interior:  $14.453 \pm 0.002 \text{ mm}$
- Diámetro exterior:  $15.875 \pm 0.002 \text{ mm}$

## **3. Cabezales**

De cobre, de 3/4".

## **4. Hoja de aluminio**

Adherida al material aislante, la hoja refleja la radiación infrarroja que pudiera llegar a su superficie hacia la placa absorbidora disminuyendo la pérdida de calor por el dorso del colector.

## **5. Cubierta**

La cubierta es vidrio templado de 5 mm de espesor, diseñado para reducir la reflejancia.

- Contenido de oxido de hierro: 0.03%
- Transmisividad solar: 91%

## **6. Aislante**

Se compone de una moldura de espuma de poliuretano rígido, colocada por debajo y alrededor de la placa absorbidora.

- Conductividad térmica:  $0.024 \text{ W/mC}$ .
- Espesor por debajo y alrededor de la placa: 1 cm respectivamente.

## **7. Sellado**

Sellado esponja, que absorbe la expansión del vidrio.



## 8. Parte inferior

El dorso es de lámina de PVC.

## 9. Caja

Moldeada en aluminio.

### 5.4 Balance térmico del calentador plano

En un colector solar es de gran importancia maximizar la energía incidente a transferirse al agua y minimizar todas las pérdidas térmicas. La figura 5.17 evidencia tales flujos de energía.

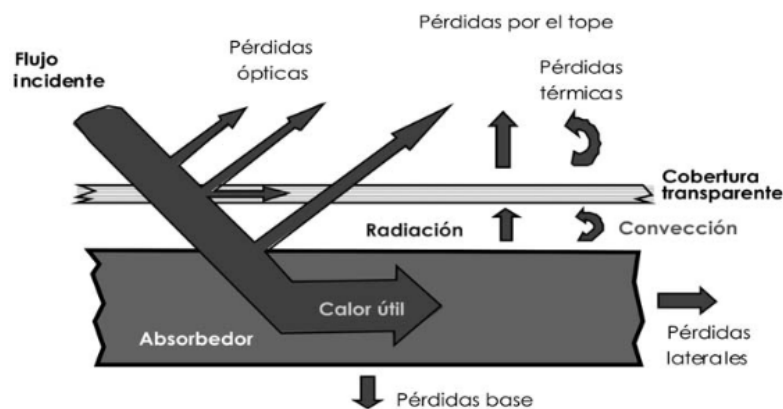


Figura 5. 17. Diagrama esquemático de los flujos de energía en un colector solar

Los parámetros para realizar el balance energético se calcula mediante la evaluación del coeficiente total de pérdidas de calor que consiste en:

- Distancia entre placa y cubierta 0.025 m

$\varepsilon_p$  = Emitancia de la placa de absorción (película selectiva) 0.12

$\varepsilon_c$  = Emitancia del vidrio 0.88

- Inclinación del colector 20°

$T_p$  = Temperatura promedio de la placa de absorción 75.0°C

- Altura del colector 0.090 m

$L$  = Espesor del aislante en el fondo 0.030 m

- Espesor del aislante en los lados 0.025 m

$k$  = Conductividad térmica del aislante  $0.0245 \frac{W}{m C}$

- Velocidad del viento (m/s): 1.20
- Temperatura ambiente: 22.4° C

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann  $5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$

- Se consideró una temperatura promedio en la placa absorbadora de 55° C.

El coeficiente de pérdidas superiores está dado:

$$U_T = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_{r,c-a}}} \quad (5.1)$$

El coeficiente convectivo es Mc Adams con datos de Jurges para una placa de  $0.5 \text{ m}^2$ , define el coeficiente convectivo externo como:

$$h_w = 5.7 + 3.8 V = 5.7 + 3.8 (1.20) = 10.241 \frac{W}{m^2 C}$$

Con una temperatura promedio de placa  $T_p$ , se midió la temperatura de cubierta  $T_c$  inicial, igual a 45° C, y se calcula  $h_{r,c-a}$ :

$$h_{r,c-a} = \frac{\sigma \varepsilon_c (T_c + T_s)(T_c^2 + T_s^2)(T_c - T_s)}{(T_c - T_a)} \quad (5.2)$$

Suponemos que la temperatura del firmamento  $T_s$ , es igual a la temperatura ambiente  $T_a$ , así la ecuación anterior se reduce a:

$$h_{r,c-a} = \sigma \varepsilon_c (T_c + T_s)(T_c^2 + T_s^2) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned}
 h_{r,c-a} &= \left( 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \right) (0.88) (318.15 K + 295.55 K) (318.15^2 K + 295.55^2 K) \\
 &= 5.774 \frac{W}{m^2 K}
 \end{aligned}$$

Luego  $h_{r,c-a}$  se calcula por la ecuación:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma (T_p + T_c)(T_p^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} - 1} \quad (5.4)$$

$$h_{r,p-c} = \frac{5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} (348.15 + 318.15)(348.15^4 - 318.15^4)}{\frac{1}{0.12} + \frac{1}{0.88} - 1} = 0.992 \frac{W}{m^2 K}$$

Para obtener el coeficiente convectivo entre la placa y la cubierta  $h_{c,p-c}$ , primero con una temperatura promedio del aire entre los dos planos de 60° C, en la Tabla 5.7 se buscan las propiedades del aire a esa temperatura y con ellas calculamos el número de Rayleigh, a esa temperatura:

$$\mu = 1.99 \times 10^{-5}, \rho = 1.059, \nu = \frac{\mu}{\rho} = 1.88 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s},$$

$$k = 0.0287 \frac{W}{mC} \text{ y } Pr = 0.70$$

Tabla 5.7. Propiedades del aire a 1 atm\*

T(K)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (Pa·s)	$\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Pr	k(W/mK)
273.15	1.292	1.72E-05	1.86E-05	0.72	0.0242
293.15	1.204	1.81E-05	2.12E-05	0.71	0.0257
313.15	1.127	1.90E-05	2.40E-05	0.70	0.0272
333.15	1.059	1.99E-05	2.69E-05	0.70	0.0287
353.15	0.999	2.09E-05	3.00E-05	0.70	0.0302
373.15	0.946	2.18E-05	3.32E-05	0.69	0.0318
393.15	0.898	2.27E-05	3.66E-05	0.69	0.0333
413.15	0.854	2.34E-05	3.98E-05	0.69	0.0345
433.15	0.815	2.42E-05	4.32E-05	0.69	0.0359
453.15	0.779	2.50E-05	4.67E-05	0.69	0.0372
473.15	0.746	2.57E-05	5.05E-05	0.68	0.0386
493.15	0.715	2.64E-05	5.43E-05	0.68	0.0399
513.15	0.688	2.72E-05	5.80E-05	0.68	0.0412
533.15	0.662	2.79E-05	6.20E-05	0.68	0.0425
553.15	0.638	2.86E-05	6.59E-05	0.68	0.0437

\*Fuente: Duffie y Beckmann. Solar engineering of thermal processes. Segunda Edición. John Wiley&Sons. 1991

### Coeficiente convectivo

El coeficiente de película o coeficiente de convección, cuantifica la influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección.

Convección: Es una de las tres formas de transferencia de calor y se caracteriza porque se produce por medio de un fluido (líquido o gas) que transporta el calor entre zonas con diferentes temperaturas. La convección se produce únicamente por medio de materiales fluidos.

Lo que se llama *convección* en sí, es el transporte de calor por medio del movimiento del fluido, por ejemplo: al trasegar el fluido por medio de bombas o al calentar agua en una cacerola, la que está en contacto con la parte de abajo de la cacerola se mueve hacia arriba, mientras que el agua que está en la superficie, desciende, ocupando el lugar que dejó la caliente.

Entonces:

$$R_a = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (5.5)$$

Donde:

$R_a$  = Coeficiente convectivo de transferencia de calor

$L$  = Distancia entre las placas

$k$  = Conductividad térmica

$g$  = Constante de gravedad

$\beta'$  = Coeficiente volumétrico de expansión (para un gas ideal  $\beta' = \frac{1}{T}$ )

$\Delta T$  = Diferencia de temperaturas entre placas

$\nu$  = Viscosidad cinemática del fluido en el encierro

$\alpha$  = Difusividad térmica

Por lo tanto:

$$R_a = \frac{9.81 (348.15 - 318.15) \{0.025\}^3 (0.7)}{333.15 * (1.88 * 10^{-5})^2} = 2.736 * 10^{-4}$$

El número de Nusselt es igual a 2.946. El coeficiente convectivo entre la placa y cubierta es:

$$h_{c,p-c} = Nu \frac{k}{L} = 3.382 \frac{W}{m^2 K}$$

El coeficiente de pérdidas superiores  $U_T$  es:

$$U_T = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c}} + \frac{1}{h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_{r,c-a}}} \quad (5.6)$$

$$U_T = \frac{1}{\frac{1}{3.382 \frac{W}{m^2 K}} + 0.992 \frac{W}{m^2 K}} + \frac{1}{\frac{1}{10.241 \frac{W}{m^2 K}} + 5.774 \frac{W}{m^2 K}} = 3.436 \frac{W}{m^2 K}$$

La nueva temperatura de cubierta es:

$$T_C = T_P - \frac{U_T(T_P - T_a)}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} \quad (5.7)$$

$$T_C = 343.15 \text{ K} - \frac{3.436 \frac{W}{m^2 K} (343.15 \text{ K} - 295.15 \text{ K})}{3.382 \frac{W}{m^2 K} + 0.992 \frac{W}{m^2 K}} = 305.45 \text{ K}$$

Con esta nueva medición de la temperatura de cubierta,  $T_C = 32.3^\circ \text{ C}$ . En la Figura 3.21 se muestra el lugar donde se colocó el sensor para realizar la medición de la temperatura de cubierta y las pérdidas superiores de calor del colector solar plano usado, operando a:  $75^\circ \text{ C}$ , con una temperatura ambiente de  $22.4^\circ \text{ C}$ , un espaciamiento entre placa y cubierta de 25 mm, una inclinación de  $20^\circ$  y una velocidad del viento de 1.20 m/s.

Las pérdidas de borde e inferiores son:

$$U_b = \frac{k}{L} = \frac{0.0245 \frac{W}{m C}}{0.030 \text{ m}} = 0.82 \frac{W}{m^2 C}$$

En este caso, con una emitancia de la película selectiva de la placa de 0.12, el mecanismo principal de transferencia de calor es la convección. El perímetro exterior fue usado para calcular las pérdidas de borde:

$$U_e = \frac{\frac{k}{L} P G_C}{A_c} \quad (5.8)$$

Donde:

$P$  = Perímetro exterior del colector  $0.30 + 0.30 + 0.20 + 0.20 = 1.0 \text{ m}$

$G_C$  = Altura de la caja del colector =  $0.06 \text{ m}$

$L$  = Espesor del aislante por los lados del colector.

$k$  = Conductividad térmica del aislante =  $0.0245 \frac{W}{m C}$

$A_c = \text{Área del colector} = 0.66 \text{ m}^2$

Distancia entre placa y cubierta = 0.025 m

Cuyo resultado es:

$$U_e = \frac{0.0245 \frac{W}{m \cdot C} * 1.0 \text{ m} * 0.06 \text{ m}}{0.66 \text{ m}^2 * 0.025 \text{ m}} = 0.0089 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

Finalmente, el coeficiente global de pérdidas del colector es:

$$U_L = U_T + U_b + U_e \quad (5.8)$$

$$U_L = 3.436 \frac{W}{m^2 \cdot K} + 0.82 \frac{W}{m^2 \cdot C} + 0.0089 \frac{W}{m^2 \cdot C} = 4.26 \frac{W}{m^2 \cdot C}$$

### **Eficiencia del calentador solar**

La capacidad del tanque es de:

$$V = A * h$$

$$A = \pi * r^2 = \pi (0.0508)^2 = 0.0081 \text{ m}^2$$

$$V = A * h = 0.0081 \text{ m}^2 * 0.2 = 0.0016 \text{ m}^3 = 1.6 \text{ l}$$

Por lo tanto la masa calentada es:

$$1.6 \text{ l} = 1.6 \text{ gr} = 0.016 \text{ Kg}$$

El calor aportado es el calor aportado es:

$$Q = m * C_p * \Delta T$$

Donde  $Q$  es el calor aportado del sistema en kCal,  $m$  es la masa del sistema en kg,  $C_p$  es el calor específico  $\frac{k \text{ cal}}{kg * ^\circ C}$ , y  $\Delta T$  es el incremento de temperatura.

Para el día de las pruebas sin seguimiento el calor absorbido fue de:

$$Q_{fijo} = m * C_p * \Delta T = 0.016 \text{ Kg} * 1 \frac{\text{k cal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (31.5 - 21.1) = 0.1684 \text{ Kcal}$$

Para el día de las pruebas con seguimiento el calor absorbido fue de:

$$Q_{seguidor} = m * C_p * \Delta T = 0.016 \text{ Kg} * 1 \frac{\text{k cal}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (36 - 21.1) = 0.2384 \text{ Kcal}$$

El porcentaje de mejora en el sistema formado en cuenta el calor absorbido sería

$$mejora = 100 * abs \left( \frac{Q_{fijo} - Q_{seguidor}}{Q_{fijo}} \right)$$

$$mejora = 100 * abs \left( \frac{0.1664 \text{ Kcal} - 0.2384 \text{ kcal}}{0.1684 \text{ kcal}} \right) = 43.26 \%$$

Este porcentaje de mejora es representativo de que el sistema mostro un mejor rendimiento con seguidor. Evidentemente no se puede hablar de un aumento en la eficiencia del 43 % ya que para ello se tendría que homogenizar la temperatura dentro del tanque, tomar las temperaturas del medio ambiente y radiación en el sitio donde está montado el sistema, las rachas de viento para las pérdidas, etc. pero deja visualizar que el sistema mejora mucho si se tiene un seguimiento solar.

En la figura 5.18 se puede observar el circuito de conexión de los sensores de temperatura hacia la tarjeta de control que procesa los datos y cuyo resultado es desplegado en el LCD.



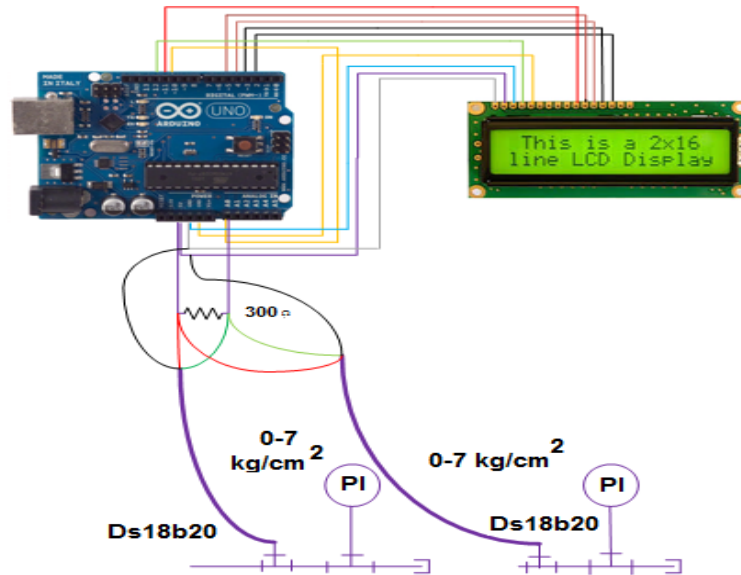


Figura 5. 18. Diagrama de conexión sensor de temperatura

En la tabla 5.8 se observan los resultados de las mediciones que se realizaron para evaluar el balance energético. Estos datos fueron obtenidos de los sensores de temperatura colocados: uno en la aleta, el segundo colocado en el tubo de entrada de agua y por último en el tubo de salida de agua (figura 5.12 y figura 5.16).

Tabla 5.8. Medición de temperatura de sensores

Hora	Temperatura (° C)		
	Tubo de entrada	Tubo de salida	Aleta
7	6	8.5	10
8	7	22.5	25
10	20	31.5	43.5
12	23	35	46
14	24	35	48.5
16	26	35	52
17	26	31.5	54.8
18	27	32	55
19	27	31	55
20	26	30	55
21	25	29	50

En la gráfica de la figura 5.19, se muestra que la temperatura en la aleta fue más alta en comparación con las otras dos mediciones. Lo cual se traduce que la eficiencia del prototipo es similar a la eficiencia de un calentador solar comercial.

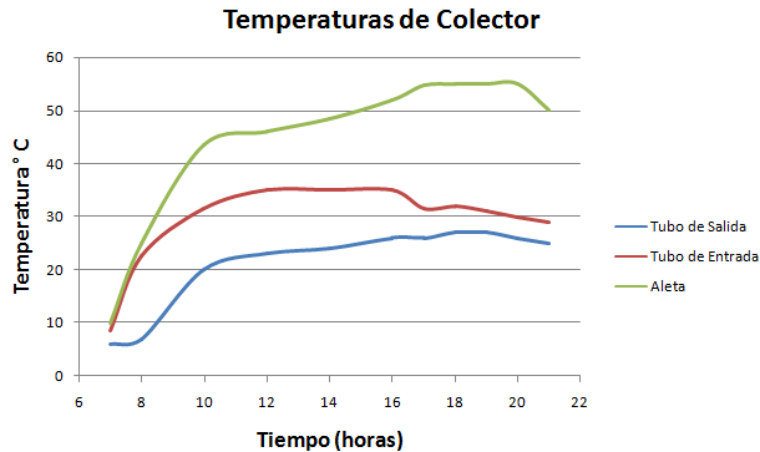


Figura 5. 19. Temperatura de Colector

### 5.5 Celda Fotovoltaica

El método que se utilizó para controlar la celda fotovoltaica fue el método de luminosidad. Este tipo de algoritmo de seguidor basa su funcionamiento en la señal entregada por los potenciómetros, dependiendo de dicha señal se envía un comando de control a uno o varios motores para que se posicionen en el punto más óptimo de luminosidad. El circuito utilizado para realizar el movimiento de azimut y altura, se muestra en la figura 5.20.

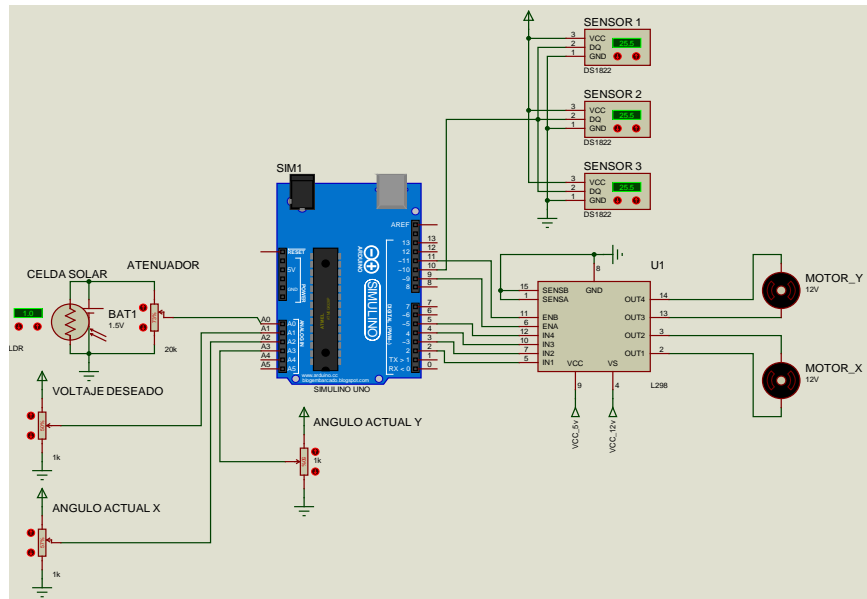


Figura 5. 20. Esquema de conexión PID

Las características principales del panel solar Modelo DBF-10-1 son:

- Monocristalino de 10 W de 35 x 29x 2.5 cm.
- 17 VCD.
- Corriente máxima de 0.58 A.
- Voltaje a circuito abierto de 20 VCD.
- Corriente de corto circuito 0.32 A.

La señal de control permite la habilitación o deshabilitación de los motores y este se activa mediante la luminosidad de la celda fotovoltaica que su vez produce un voltaje que sirve como referencia para activar los de acuerdo a la orientación del Sol.

La utilización de un puente H permite controlar un solo motor con salidas distintas, permitiendo que gire en ambos sentidos, para localizar la mayor cantidad de luz (irradiancia), para que el seguidor solar tenga un mejor rendimiento.

El programa que gestiona el movimiento de los motores a través del PID se muestra en la figura 5.21.

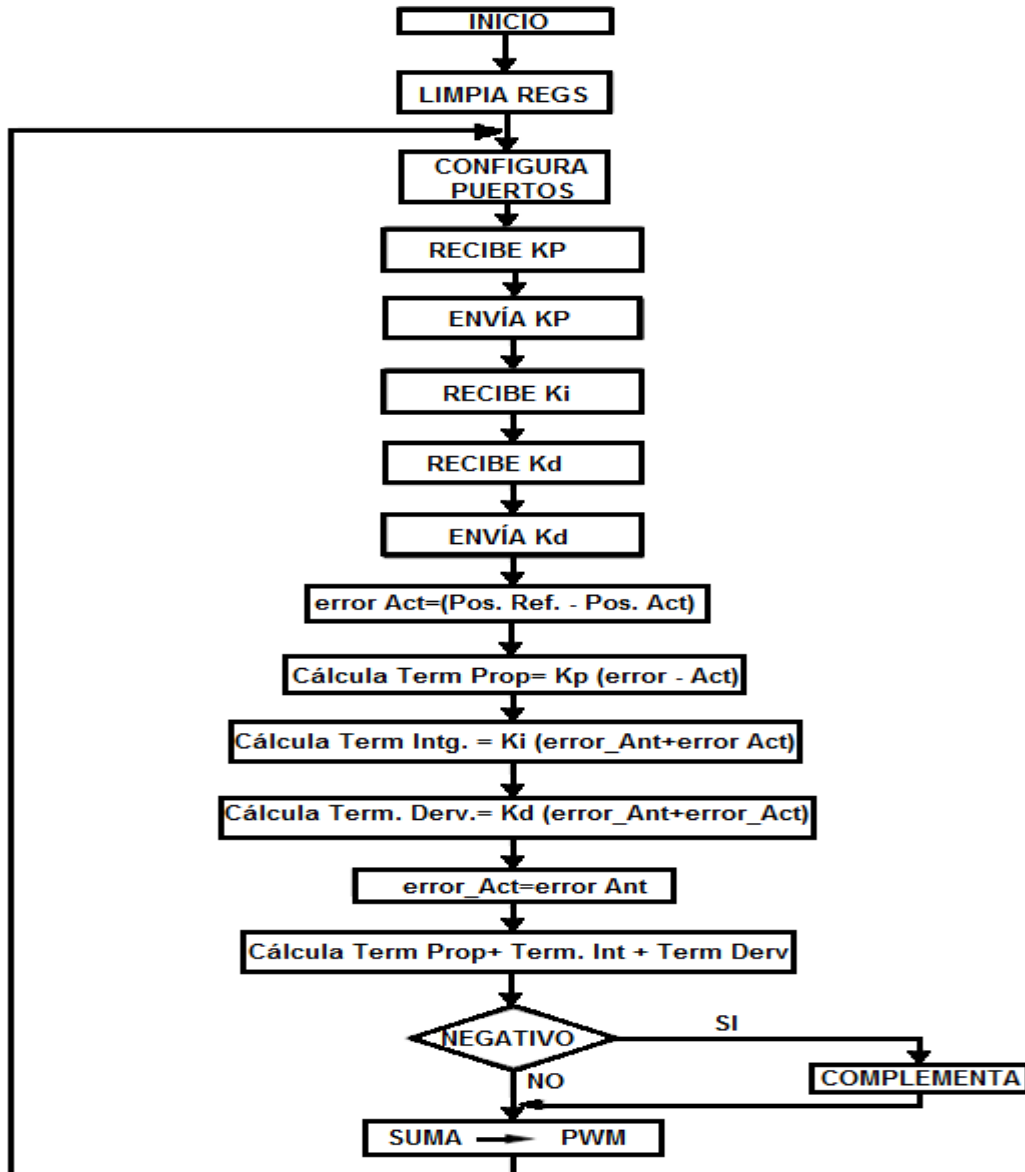


Figura 5. 21. Diagrama de flujo PID

Para el sentido de posición del panel solar mediante el método de seguidor solar, se emplean dos motores de CD, los cuales son usados para que la base del panel se desplace en dos ejes: el Azimut y la altura solar. Dichos motores tienen la característica de velocidad y torque necesarios para obtener un correcto funcionamiento, alimentados con una batería de 12 VCD. La ubicación de los motores es: uno montado sobre la base fija y el otro sobre la base móvil (figura 5.22).

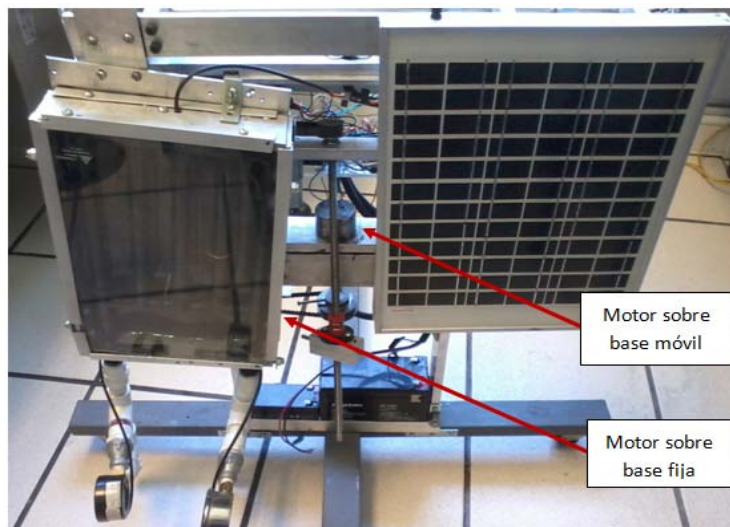


Figura 5. 22. Ubicación de motores

En la tabla 5.9 se muestran los resultados de consumo desglosado del sistema.

Tabla 5.9. Consumo de prototipo

	<b>Potencia</b>
<b>Motor</b>	0.0095 KW
<b>Motores</b>	0.019 KW
<b>Microcontrolador</b>	0.00000024 W
<b>Potencia total</b>	0.0190024 KW
<b>Consumo Total</b>	0.0190048 KWH
<b><math>\frac{KWH - DÍA}{m^2}</math></b>	1.49

# CAPÍTULO VI

## DISEÑO MÉCANICO

### 6.1 PARTE MECÁNICA

Se realizó el diseño del seguidor solar por medio del Software de Catia, posteriormente que se tenía los diseños se realizó la compra de material y posteriormente se realizó la maquila de piezas en aluminio.

Parte de montaje de la celda fotovoltaica y el calentador solar

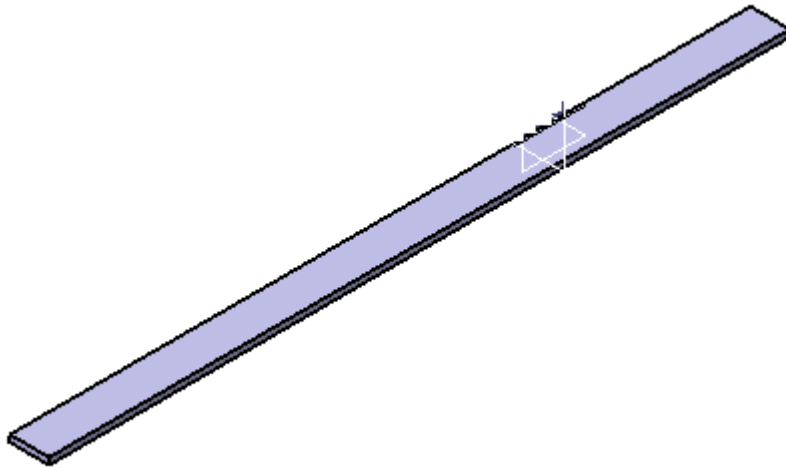


Figura 6. 1 Base del montaje de la celda fotovoltaica y el calentador solar.

Piezas (6) para realizar el movimiento de altura solar, mediante el acoplamiento de los baleros y las guías de acero inoxidable.



Figura 6. 2 Pieza para realizar el movimiento de altura solar.

Parte superior de la base para poder realizar el movimiento Azimut



Figura 6. 3 Parte superior de la base del movimiento Azimut

Parte superior de base móvil, para realizar el movimiento Azimut del calentador solar y el panel fotovoltaico.

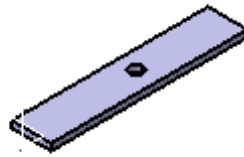


Figura 6. 4 Parte superior de la base móvil, para realizar el movimiento Azimut

Parte lateral izquierda y derecha que realiza el movimiento altura solar

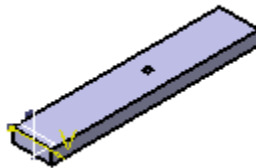


Figura 6. 1 Parte lateral que realiza el movimiento altura solar

Parte superior del soporte que realiza el movimiento Azimut, y sujeta el balero para realizar el movimiento.

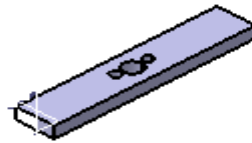


Figura 6. 6 Parte superior que realiza el movimiento Azimut  
Parte lateral del soporte de la base que realiza el movimiento Azimut

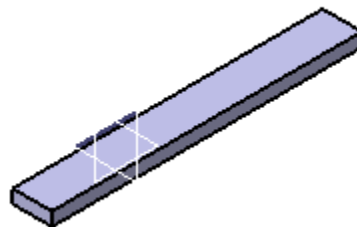


Figura 6. 7 Parte lateral del soporte de la base

Tornillo y tuerca ACME que realiza el movimiento de Altura Solar



Figura 6. 8 Tornillo con cuerda ACME



Base para montar el seguidor solar, con 4 ruedas para el movimiento en la parte superior

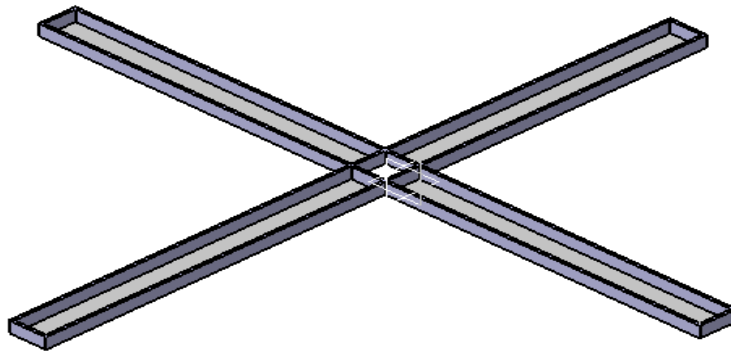


Figura 6. 9 Base del seguidor

Parte superior de la base del movimiento Azimut que se le agregara el eje y los baleros, para realizar el movimiento del motor.

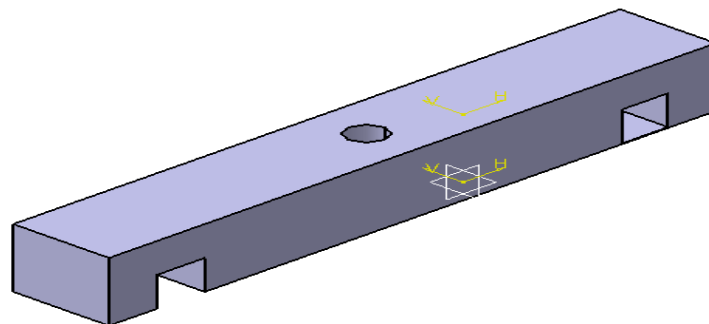


Figura 6. 10 Parte superior base movimiento Azimut

Eje para realizar el montaje del motor para poder realizar el movimiento Azimut



Figura 6. 11 Eje para montaje de motor movimiento Azimut

# CAPÍTULO VII

## RESULTADOS

Los resultados se dividen en dos partes: La primera explica los experimentos realizados para la comprobación de la eficiencia del sistema, la segunda presenta los resultados obtenidos en los experimentos y construir un prototipo didáctico de un seguidor solar térmico (híbrido).

Recordemos que el objetivo central, consiste en diseñar un seguidor solar aplicando un sistema de control PID, por lo cual es necesario evaluar la eficiencia del sistema por medio del análisis de la respuesta del sistema contemplando diversos parámetros aplicados en el PID.

Se consideraron diversos parámetros para la realización del análisis del sistema de control digital, uno de los cuales es el comportamiento de las curvas del sistema de control: este parámetro evalúa la respuesta del sistema a un escalón unitario, de los parámetros de voltaje y de salida del PID.

El siguiente parámetro que se analizó, es el comportamiento del error en el sistema: el cual proporciona información sobre la eficiencia del sistema que permite obtener información referente a la constante de tiempo del sistema, el error de estado estacionario, el tiempo de subida, el tiempo de establecimiento, entre otros elementos inmersos en los sistemas de control discretos.

La figura 7.1, muestra la respuesta del sistema al escalón unitario, la línea de color azul representa la señal deseada, que es el voltaje deseado en la celda solar, mientras que la de color rojo (actual) representa la señal actual de voltaje presente en el panel solar. Se observa que en el intervalo de establecimiento, la señal actual de voltaje presenta una oscilación. Esta oscilación se presenta por

factores físicos del mecanismo, además de que solo fue contemplada la orientación vertical del sistema para evaluar la eficacia del PID en una sola orientación. Hasta llegar a la posición de  $30^\circ$

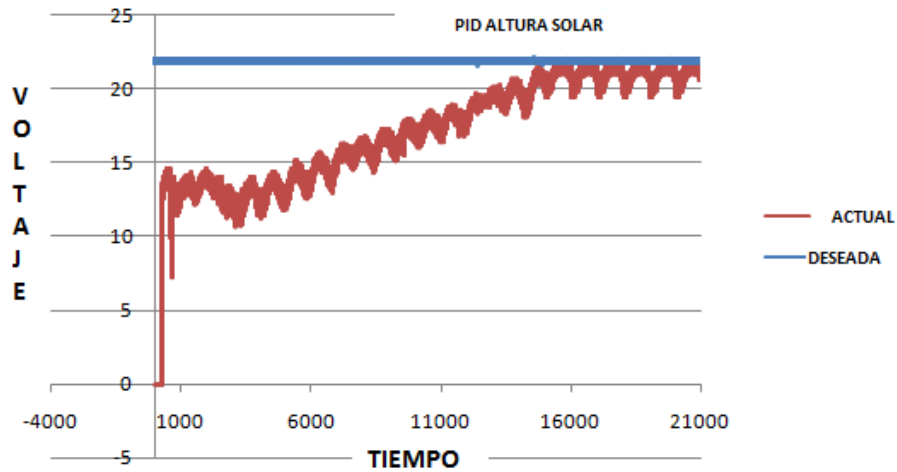


Figura 7.1 Altura solar PID

En la figura 7.2, muestra como se realizó la prueba de altura solar. El movimiento se generó de forma vertical.



Figura 7.2. Movimiento altura solar

El error medido del sistema de control correspondiente a la orientación vertical del sistema presenta un comportamiento exponencial decreciente, el cual

es característico en los sistemas de control de lazo cerrado, en la figura 7.3, se observa el pico máximo de error, el cual representa el estado inicial del sistema.

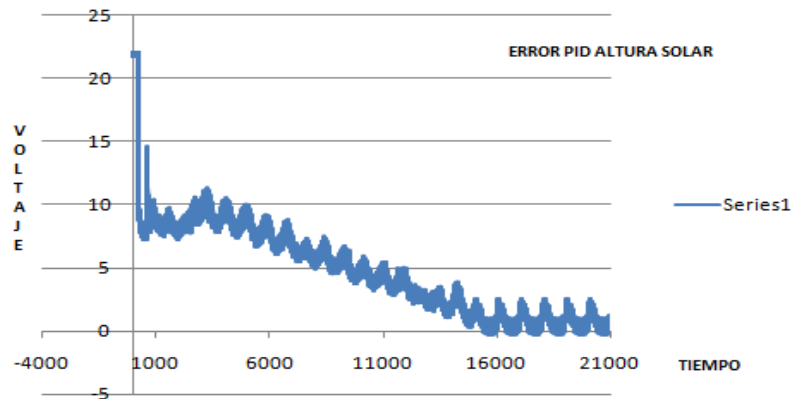


Figura 7.3. Error PID de altura solar

La siguiente gráfica (figura 7.4) muestra el comportamiento del sistema de control contemplando la orientación Azimut, se expresa la señal deseada de voltaje mediante la línea marcada en color verde, mientras que la respuesta actual del sistema se ve reflejada en la línea color rojo; se observa el comportamiento del sistema al presentarse una perturbación en la zona de estabilización, lo cual permite afirmar que el sistema mantiene una señal de salida ante cualquier tipo de perturbación.

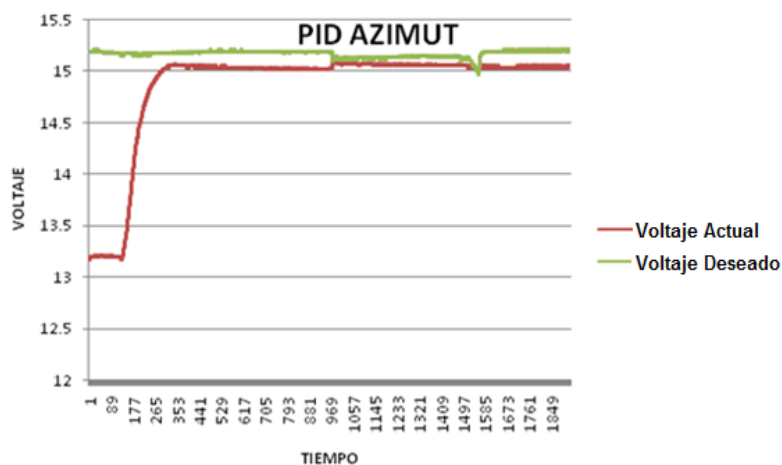


Figura 7. 4. PID Azimut

En la figura 7.5, muestra como se realizó la prueba de azimut. El movimiento generado es de forma horizontal.



Figura 7. 5. Movimiento Azimut

Se observa que la señal actual del sistema parte por encima de 13 V, esto se debe, a que el PID correspondiente a la altura solar realiza un control de voltaje de 0 V a 13 V lo que se traduce en un intervalo de error reducido para el azimut, esto se llevo a cabo mediante un análisis previo del error del sistema y del comportamiento del mismo.

El error en este control es de alrededor de 0.5 V, esto es debido a que en este intervalo de voltaje el sistema apaga los motores para mantener un ahorro de energía considerable, ya que en caso contrario los motores consumirían la mayor cantidad de energía tratando de estabilizar el sistema con un error igual a cero.

Como resultado de este análisis se obtuvo una división del error del sistema que potencializa la eficacia del sistema, ya que los PID funcionan de manera conjunta reduciendo así el tiempo de operación de cada sistema de control y por consiguiente ahorrando la máxima cantidad de energía posible, ya que solo funciona un PID a la vez.

El sistema de control posee un bloque de programación que analiza el intervalo de error y determina si el error es lo suficientemente grande para que el controlador PID entre en funcionamiento, esto genera un ahorro en la energía del sistema debido a que los motores no se encuentran en funcionamiento constante.

Para la realización de este sistema se tomo en consideración que el tiempo que tarda el sol en cambiar de posición es de alrededor de 2 minutos, cada  $\frac{1}{2}^\circ$  (grado), en la figura 7.6, se observa la salida del PID que se inyecta a los motores, también se observa el tiempo en el cual el motor tiene un voltaje necesario para mover el motor que es proporcional al tiempo muerto del motor.

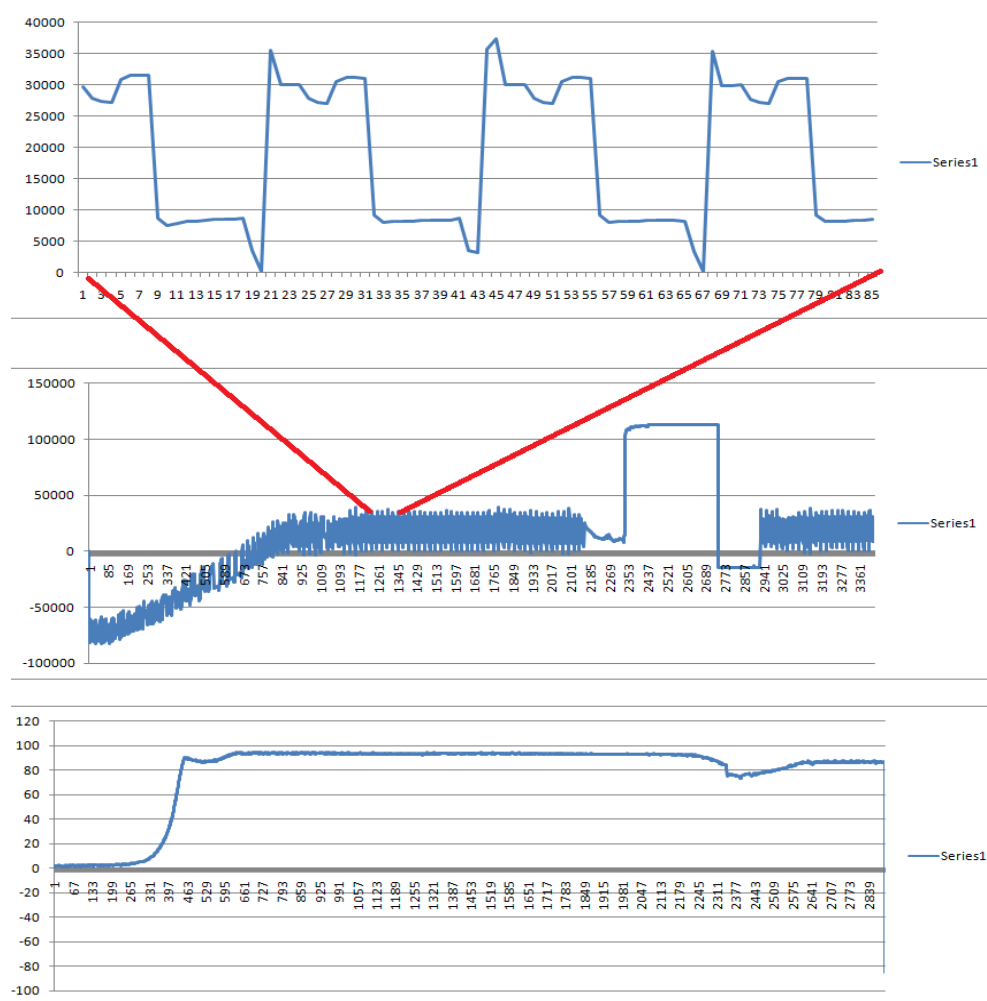


Figura 7. 6. Análisis de la respuesta del PID en Azimut

En la tabla 7.1 se muestran los resultados comparativos entre un panel fijo y el prototipo del seguidor de voltaje desarrollado.

Tabla 7.1. Cuadro comparativo de voltajes

Horas	Panel Fijo	Seguidor solar
	Volts	Volts
7	14.65	22
8	15.64	22
9	16	22
10	18.88	22
11	19.04	22
12	19.32	22
13	19.33	22
14	19.31	22
15	18.42	22
16	17.77	22
17	15.99	22
18	13.12	22
19	9.99	22

El resultado final del sistema se observa en la figura 7.7 y figura 7.8, donde se muestra el voltaje de la celda en un sistema fijo en comparación con el voltaje obtenido con la implementación del sistema de control, aplicando controladores PID. Se observa el incremento en el voltaje obtenido de la celda, estos resultados tienen una importancia relevante debido a que el voltaje obtenido se aplica a un controlador de carga que requiere de un voltaje constante para suministrar una corriente constante a la batería.

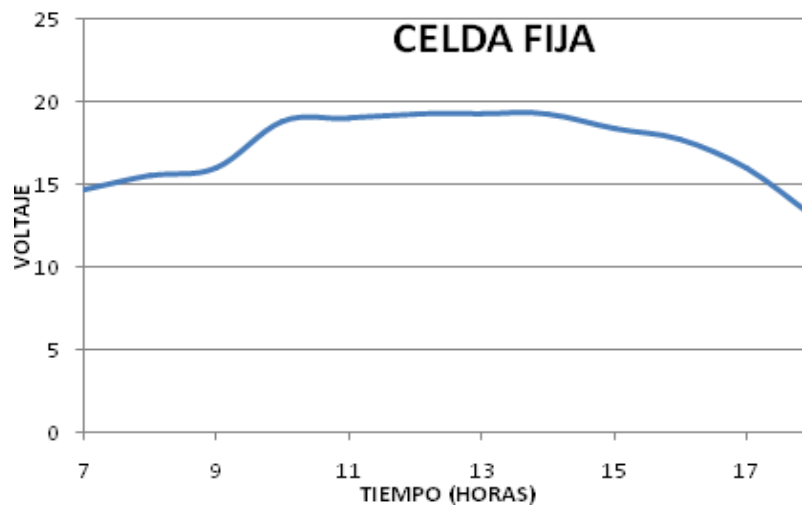


Figura 7.7. Celda solar en posición fija

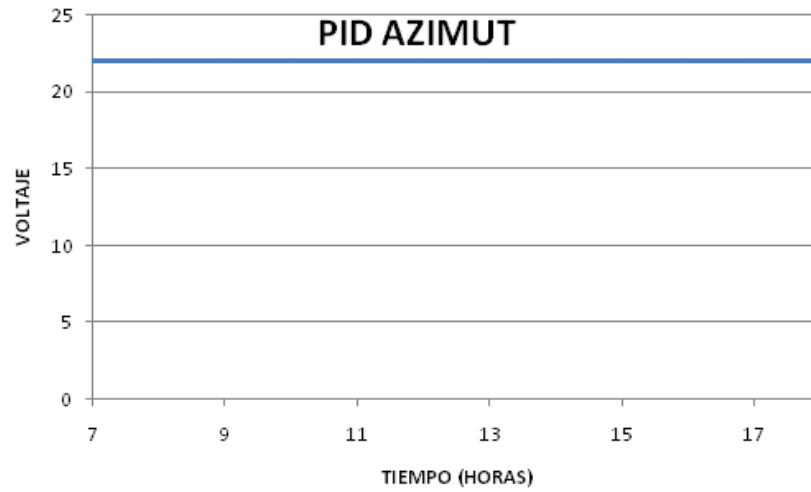


Figura 7.8 Celda solar con seguidor

El prototipo final desarrollado se muestra en la figura 7.9.

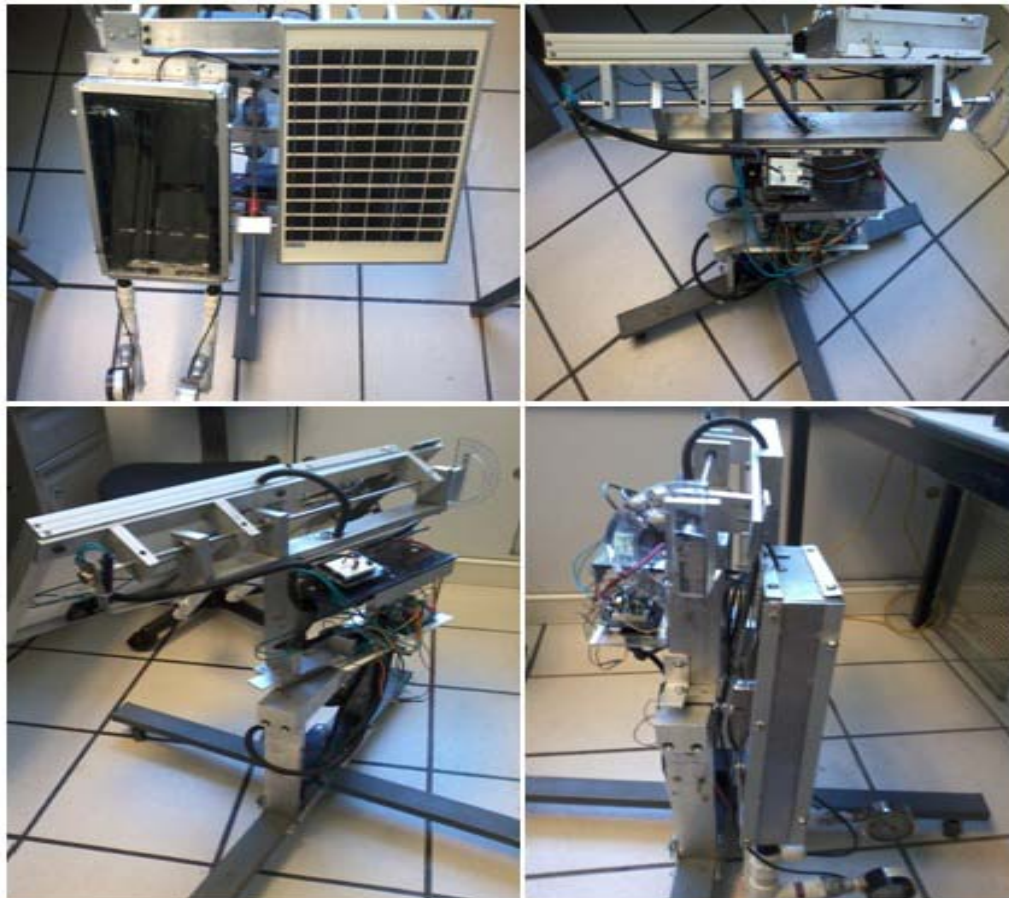


Figura 7.9. Prototipo de Seguidor solar



Tabla 7.2. Cuadro comparativo de voltajes

Tiempo	Colector plano Fijo	colector plano con seguidor
Horas	Temperatura	Temperatura
7	8.5	30
8	22.5	31
10	31.5	36
12	35	36
14	35	36
16	35	35
17	31.5	35
18	32	32

El resultado final del sistema se observa en la figura 7.7 y figura 7.8, donde se muestra el voltaje de la celda en un sistema fijo en comparación con el voltaje obtenido con la implementación del sistema de control, aplicando controladores PID. Se observa el incremento en el voltaje obtenido de la celda, estos resultados tienen una importancia relevante debido a que el voltaje obtenido se aplica a un controlador de carga que requiere de un voltaje constante para suministrar una corriente constante a la batería.

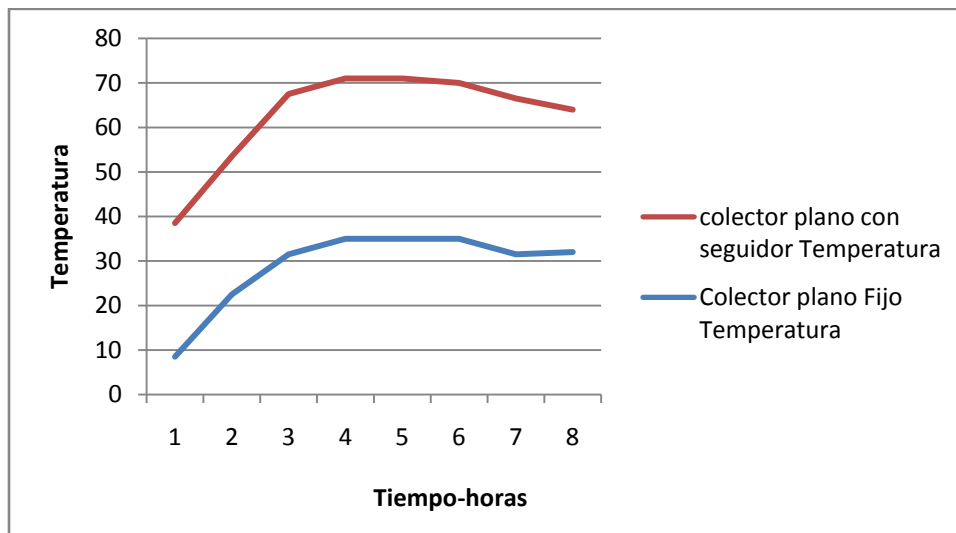


Figura 7.10. Calentador plano en posición fija y con seguidor solar

## CONCLUSIONES

El desarrollo de un seguidor solar híbrido contribuye al logro de la competencia del programa de estudios de TSU y Ingeniería en Energías Renovables, con énfasis en fotovoltaica y térmica y de la misma manera a la continuidad del desarrollo de una cultura en el uso racional de la energía a través del conocimiento de la aplicación de las energías renovables, específicamente a la energía fotovoltaica y los efectos del cambio climático, así como fomentar el desarrollo sustentable de las mismas.

Y contribuir al desarrollo tecnológico para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

También se puede concluir que los objetivos marcados al inicio del trabajo se cumplieron satisfactoriamente; debido a que se consiguió la implementación del sistema mecánico sencillo y económico y con un diseño robusto de las piezas metálicas que lo conforman pero a la vez flexibles.

Por lo tanto se logró un funcionamiento correcto en la parte electrónica.

Se logró concluir que un seguimiento solar del tipo de completo es más eficiente, que una celda fija. Lo cual se argumenta basándonos en la Tabla del Apéndice sobre la eficiencia de seguidores solares y panel fijos.

El cual se realizó aplicando el movimiento de Altura Solar con el controlador PID a  $30^\circ$  y posteriormente se siguió la trayectoria del Sol con el Movimiento Azimut aplicado con el controlador PID.

Y se plantea trabajar a futuro con filtro en la parte del movimiento Azimut, para evitar la vibración debido a la cuerda ACME; e instalar un controlador tangente hiperbólico para mejorar la respuesta de salida.

El monitoreo remoto del sistema es una tarea que ayudaría a la obtención de variables sin necesidad de tener una PC descargando en el sitio los datos.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Energías Renovables. Antonio Creus Solé. Ediciones de la U. 2ª. Edición. Bogotá. 2014.
- 2.- Instalaciones Eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Enríquez Harper Gilberto. Editorial Limusa. México. 2010.
- 3.- Energía Solar Térmica. Miguel Ángel Sánchez Maza. Editorial Limusa. 1ª. Edición. México. 2010.
- 4.- Fundamentos y Aplicaciones Fotovoltaicas. Osvaldo Vergel Galán. 1ª. Edición. Editorial IPN. México. 2010.
- 5.- Tecnología Solar. Miguel Ibáñez Plana. Joan Ramón Rosel Polo; José Luis Rosell Urrutia. Editorial John and Wiley and Sons. 1a. Edición. Madrid. 2005.
- 6.- Aplicaciones de Energía Solar. José Aden B. Meinel. Ediciones Reverte. 1a. Edición. Madrid. 1992
- 7.- Celdas Solares. Jean Paul Bran Editorial Trillas. 1ª. Edición. México. 1999.
- 8.- Instalación de Paneles Solares Térmicas. Tomás Perales Benito 3ª. Edición. México. 2008
- 9.- Libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones. Danny Andrés Arenas Sánchez. Hodman Steven Zapata Castaño. Universidad Tecnológica de Pereira. 2011
- 10.- Energías Renovables. Centro de Investigación en Energía. UNAM. 2010
- 11.- Energía Solar Fotovoltaica en la Comunidad de Madrid. Asociación de la Industria Fotovoltaica. 4ª. Edición. 2010
- 12.- Energía Solar Térmica. Salvador Escoda, S.A. Barcelona. 2012
- 13.- Libro de Ciencia y Tecnología N° 2. Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía. Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, México, 2009 ISBN 978-607-95065-0-6 Héctor M. Poggi-Varaldo (CINVESTAV), Alfonso Martínez Reyes (TESE), José A. Pineda-Cruz (TESE), Sergio Caffarel-Méndez (TESE), Coeditores.
- 14.- Energía Solar Fotovoltaica. Edita: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. Madrid. 2010. ISBN 978-84-935049-6-0

## ANEXO A

### RENDIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS COLECTORES

GEOMETRÍA	ENERGIA RECOGIDA				PORCENTAJE RESPECTO AL COLECTOR DE SEGUIMIENTO COMPLETO		
	VERANO	EQUINOCCIO	INVIERNO	UNIDADES	VERANO	EQUINOCCIO	INVIERNO
SEGUIMIENTO COMPLETO (45 °C) (D)	11.47	7.89	4.40	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	100	100	100
	41.3	28.4	15.7	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.63	2.5	1.39	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO COMPLETO (30 °C) (D)	10.82	8.85	6.24	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	100	100	100
	39.0	32.0	22.4	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.44	2.81	1.97	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO COMPLETO (45 °C) (D + S)	12.67	8.59	5.1	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	110	110	110
	46.0	30.9	17.9	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	4.02	2.73	1.57	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO COMPLETO (30 °C) (D + S)	11.96	9.6	6.24	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	110	110	110
	43.0	34.4	22.4	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.79	3.05	1.97	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
PLACA PLANA HORIZONTAL (45 °C) (D)	7.54	4.31	1.23	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	64	54	27
	27.0	15.5	4.5	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.38	1.36	0.42	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
PLACA PLANA HORIZONTAL	7.85	5.53	3.0				

(30 °C) (D)	28.5	20.0	10.8	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	72	63	46
	2.50	1.75	0.95	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
				$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
PLACA PLANA HORIZONTAL (45 °C) (D + S)	8.55	4.90	1.62	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	73	64	37
	31.0	18.0	5.8	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.70	1.57	0.51	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
PLACA PLANA HORIZONTAL (30 °C) (D + S)	8.90	6.34	3.50	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	82	72	56
	32.0	22.9	12.7	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.82	2.01	1.10	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD (45 °C) (D)	6.48	6.10	3.43	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	56	76	78
	23.3	21.8	12.3	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.05	1.94	1.09	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD (30 °C) (D)	6.47	6.33	4.87	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	59	72	79
	23.3	22.8	17.6	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.05	2.00	-1.53	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD (45 °C) (D + S)	7.60	7.00	3.95	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	64	86	88
	27.3	25.0	14.2	$\frac{MJ}{\text{día}}$			

INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD (30 °C) (D + S)	2.40	2.21	1.25	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$	69	82	89
	7.63	7.28	5.56	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$			
	27.5	26.2	20.0	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.41	2.30	1.76	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD +15 (D) (45° C)	4.63	6.16	3.56	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	40	79	81
	16.7	22.2	12.8	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	1.47	1.95	1.13	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD +15 (D) (30° C)	4.79	6.49	5.10	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	44	74	81
	17.4	23.4	18.4	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	1.54	2.06	1.62	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD +15 (D + S) (45° C)	5.80	7.04	4.08	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	49	89	91
	20.7	25.3	14.6	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	1.83	2.23	1.29	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
INCLINACIÓN IGUAL A LA LATITUD +15 (D + S) (30° C)	6.0	7.45	5.80	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	54	84	91
	21.4	26.7	20.8	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	1.89	2.35	1.84	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
VERTICAL (D) (45° C)	1.65	3.98	3.57	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	14	52	82
	5.95	14.3	12.9	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	0.52	1.26	1.14	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			

VERTICAL (D) (30° C)	0.36	3.22	4.40	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	3	36	71
	1.3	11.6	15.8	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	0.12	1.03	1.40	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
VERTICAL (D + S) (45° C)	2.40	4.82	4.40	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	22	62	92
	8.8	17.3	15.9	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	0.78	1.53	1.40	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
VERTICAL (D + S) (30° C)	1.27	4.16	5.17	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	12	46	81
	4.6	14.9	19.1	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	0.40	1.32	1.68	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
EJE POLAR (D) (45° C)	11.20	7.90	3.97	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	94	100	93
	40.0	28.4	14.3	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.51	2.50	1.26	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
EJE POLAR (D) (30° C)	10.20	8.83	5.91	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	93	76	46
	36.7	31.8	21.6	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.24	2.80	1.88	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO E-W; EJE HORIZONTAL NS (45° C)	11.21	6.04	1.99	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	95	76	46
	40.2	21.8	7.2	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.54	1.92	0.63	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			



SEGUIMIENTO E-W; EJE HORIZONTAL NS (30° C)	10.80	8.03	4.45	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	97	90	71
	39.0	28.9	16.1	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	3.43	2.55	1.41	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
ESTACIONAL; EJE HORIZONTAL EW (D) (45° C)	6.65	6.07	3.72	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	58	77	86
	23.9	21.9	13.4	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.11	1.93	1.18	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
ESTACIONAL; EJE HORIZONTAL EW (D) (30° C)	6.92	6.41	5.50	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	64	73	88
	24.9	23.1	19.8	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.20	2.03	1.71	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO N-S; EJE HORIZONTAL EW (45° C)	8.94	6.11	3.92	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	74	77	91
	30.7	21.4	14.1	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.69	1.88	1.24	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			
SEGUIMIENTO N-S; EJE HORIZONTAL EW (30° C)	8.18	6.50	5.72	$\frac{Kwh}{m^2 \text{ día}}$	75	72	91
	29.4	23.4	20.6	$\frac{MJ}{m^2 \text{ día}}$			
	2.59	1.97	1.82	$\frac{KBTU}{ft^2 \text{ día}}$			

Fuente: Aplicaciones de Energía Solar. José Aden B. Mervel. Ediciones Reverte. 1a. Edición.  
Madrid. 1992

## Anexo B Programa para la medición de la Temperatura Calentador Plano

*/\*Sistema de comunicacion monitoreo y transmision de la temperatura en un sistema de posicionamiento angular de un panel solar\*/*

```
#include <OneWire.h>
```

```
#include <DallasTemperature.h>
```

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
/* se conectan los sensores al pin 10 empleando el protocolo de comunicacion 1-WIRE*/
```

```
#define ONE_WIRE_BUS 10
```

```
// Configuramos para comunicar con otros dispositivos 1-Wire
```

```
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
```

```
// Indicamos el pin asignado al sensor 1-Wire a DallasTemperature
```

```
DallasTemperature sensores(&oneWire);
```

```
// configuramos el LCD
```

```
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
```

```
float val=0; // variable donde guardaremos la temperatura leída del sensor
```

```
int i; //variable que contiene el numero de sensores empleados
```

```
void setup(void)
```

```
{
```

```
//Inicializamos el LCD
```

```
lcd.begin(16, 2);
```

```
//Inicializamos el puerto serial
```

```
Serial.begin(9600);
```

```
// Inicializamos la libreria
```

```
sensores.begin();
```

```
}
```

```
void loop(void)
```

```

{
// funcion para reconocimiento y comunicacion de los sensores
for(i=0;i<=2;i++)
{
sensores.requestTemperatures(); //Enviamos el comando para obtener la temperatura

float val = sensores.getTempCByIndex(i); // Almacenamos la temperatura en la variable val

Serial.write(35 + i);

Serial.print(val); //Mostramos por puerto serie el valor de la temperatura leida

lcd.setCursor(0, 0);

// Desplegamos la temperatura en el LCD

lcd.print("Temp S");

lcd.print(i);

lcd.print(":");

lcd.print(val);

lcd.print(" C");

}

Serial.write(38);

Serial.println();

delay(150); //Esperamos 1500ms

}

```

## Anexo C. Programa PID Híbrido

```
String inputString = "";    // a string to hold incoming data

boolean stringComplete = false; // whether the string is complete

char inChar, rx[5];

int i, x;

#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

/* se conectan los sensores al pin 10 empleando el protocolo de comunicacion 1-WIRE*/

#define ONE_WIRE_BUS 10

int x_min = 0 ;

int x_max = 0 ;

int y_min = 0 ;

int y_max = 0 ;

//int listo = 0 ;

int estado = 0;

int casa_y = 0;

int casa_x = 0;

float temp1, temp2, temp3 ;

float t[3],PIDY;

float val=0; // variable donde guardaremos la temperatura leida del sensor

int ii; //variable que contiene el numero de sensores empleados

// Banderas de cálculo de error para ambos ejes

int Y_listo = 0;

int X_listo = 0;

char rx_data[19];

byte PWMOutput;
```

```
long Error[10];
long ErrorX[10];
long Accumulator;
long PID;
int PTerm;
int ITerm;
int DTerm;
byte Divider;
int direccion;
//int i;
int listo;
word ActualPosition;
word ActualPositionX;
signed int DesiredPositionX;
signed int DesiredPosition;
word ActualVoltage;
word DesVol1;
word DesiredVoltage;
word DesiredVoltage1;
long errorVoltage;
word variable;
// Declaracion de pines
int ActPos = A0;
int ActVol = A1;
int DesVol = A2;
int ActPosX = A3;
```

```

void setup()
{
  inputString.reserve(200);

  //Configuracion de puerto
  pinMode(13, INPUT);

  //Pines direccion eje Y
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);

  //Pines direccion eje X
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);

  //sensores.begin();

  // Inicializacion serial
  Serial.begin(115200);

  // Inicializacion parametros minimos y maximos para cada eje
  inputString.reserve(200);

  // Eje X Estos valores se deben MEDIR BIEN ESTOS SON PARA PRUEBA
  int x_min = 20 ;
  int x_max = 907 ;

  // Eje Y
  int y_min = 65 ;
  int y_max = 253 ;

  // Pantalla de presentacion
  Serial.println("Seguidor Solar Aut3nomo V2.1");
  Serial.println("Configuraci3n inicial de Parametros");
  Serial.print("Y_min: ");

```

```

Serial.print(y_min, DEC);

Serial.print(" Y_max ");

Serial.print(y_max, DEC);

Serial.print(" X_min: ");

Serial.print(x_min, DEC);

Serial.print(" X_max: ");

Serial.println(x_max, DEC);

// Posicionamiento del robot en los ejes

// Eje Y

//while(casa_y != 1 )

//{

// word ActualPosition = analogRead(ActPos);

//

// if(ActualPosition >= y_min )

// {

// //baja el panel a velocidad media

// Serial.print(" P_A_Y= ");

// Serial.print(ActualPosition,DEC);

// Serial.println();

// digitalWrite(3, HIGH);

// digitalWrite(2, LOW);

// analogWrite(9, 255);

// casa_y=0;

//

// }

//

```

```

// if(ActualPosition <= (y_min-5) )
// {
// // sube el panel a velocidad media
// Serial.print(" P_A_Y= ");
// Serial.print(ActualPosition,DEC);
// Serial.println();
// digitalWrite(2, HIGH);
// digitalWrite(3, LOW);
// analogWrite(9, 255);
// casa_y=0;
// }
//
// if(ActualPosition > (y_min-5) && ActualPosition < y_min )
// {
// //para el eje Y
// Serial.print(" P_A_Y= ");
// Serial.print(ActualPosition,DEC);
// Serial.println();
// digitalWrite(3, LOW);
// digitalWrite(2, LOW);
// analogWrite(9, 0);
// casa_y = 1;
// }
//
//}
//

```



```

// // Eje X
//
//
//while(casa_x != 1 )
//{
// word ActualPositionX = analogRead(ActPosX);
//
// if(ActualPositionX >= x_min )
// {
// //baja el panel a velocidad media
// Serial.print(" P_A_X= ");
// Serial.print(ActualPositionX,DEC);
// Serial.println();
// digitalWrite(5, HIGH);
// digitalWrite(4, LOW);
// analogWrite(11, 75);
// casa_x=0;
//
// }
//
// if(ActualPositionX <= (x_min - 5) )
// {
// // sube el panel a velocidad media
// Serial.print(" P_A_X= ");
// Serial.print(ActualPositionX,DEC);
// Serial.println();

```

```

// digitalWrite(4, HIGH);
// digitalWrite(5, LOW);
// analogWrite(11, 75);
// casa_x=0;
// }
//
// if(ActualPositionX > (x_min -5) && ActualPositionX < x_min )
// {
// //para el eje Y
// Serial.print(" P_A_X= ");
// Serial.print(ActualPositionX,DEC);
// Serial.println();
// digitalWrite(5, LOW);
// digitalWrite(4, LOW);
// analogWrite(11, 0);
// casa_x = 1;
// }
//
//}
////

}

void loop()
{

```

```

while(1)
{
    word DesiredVoltage = analogRead(DesVol);
    word ActualVoltage = analogRead(ActVol);
    word ActualPosition = analogRead(ActPos);
    word ActualPositionX = analogRead(ActPosX);

    //Sen_temp();

    //TRAMA ! horizontal # vertical ( vol_deseado & vol_actual / hor_d = ver_d ? T1 % T2 + T3 -
PID *
//    Serial.write(33); // imprime !
//    Serial.print(ActualPositionX,DEC); // Horizontal
    Serial.write(35); // imprime #
    Serial.print(ActualPosition,DEC); // Vertical
    Serial.write(40); // imprime (
    Serial.print(DesiredPosition,DEC); //voltaje deseado
//    Serial.write(38); // imprime &
//    Serial.print(ActualVoltage,DEC); //voltaje deseado
//    Serial.write(47); // imprime /
//    Serial.print(DesiredPositionX,DEC); // posicion deseadaX
//    Serial.write(61); // imprime =
//    Serial.print(DesiredPosition,DEC); // posicion deseada Y
//
//    Serial.write(63); // imprime ?
//    Serial.print(t[0]);

```

```
// Serial.write(37); // imprime %
// Serial.print(t[1]);
// Serial.write(43); //imprime +
// Serial.print(t[2]);
Serial.write(45); // imprime -
Serial.print(PIDY,DEC);
Serial.write(42); // imprime *

Serial.println();
//delay(50);

//calculo del error
Get_Error();
// //PID vertical
CalculoPID(1);
//PID horizontal
// CalculoPID(2);
}

}
```

```

void Get_Error()
{
    // |_____||_____|_____|_____||
    // -200      -20  0   20      200

    // el error entre -20 a 20 es el error para el eje X
    // el error fuera de ese rango es para el eje Y

    byte i = 0;

    // Eje X  Estos valores se deben MEDIR BIEN ESTOS SON PARA PRUEBA
    int x_min = 280 ;
    int x_max = 643 ;

    // Eje Y
    int y_min = 140 ;
    int y_max = 450 ;

    //
    //
    // int ActPos = A0;
    // int ActVol = A1;
    // int DesVol = A2;
    // int ActPosX = A3;

    word DesiredVoltage = analogRead(DesVol);
    word ActualVoltage = analogRead(ActVol);
    word ActualPosition = analogRead(ActPos);
    word ActualPositionX = analogRead(ActPosX);

```

```

DesiredPosition=DesiredVoltage;

for(i=0;i<10;i++)
{
    Error[i+1] = Error[i];

    Error[0] = (long)DesiredPosition-(long)ActualPosition;
}

}

void CalculoPID(int eje)
{
    // Constantes del PID

    PTerm = 200;// 2000

    ITerm = 30;

    DTerm = 0;

    Divider = 1;

    // Eje Y

    if(eje == 1)
    {

        PID = Error[0]*PTerm; // start with proportional gain

        Accumulator += Error[0]; // accumulator is sum of errors

        PID += ITerm*Accumulator; // add integral gain and error accumulation
    }
}

```

```

PID += DTerm*(Error[0]-Error[9]); // differential gain comes next

PID = PID >> Divider; // scale PID down with divider

PIDY = PID;

//limites del PID

if(PID>250)

{

    PID=250;

}

if(PID<-250)

{

    PID=-250;

}

//Direccion de giro

if(PID>0)

{

    direccion = 1 ;

    PID = PID;

    digitalWrite(2, HIGH);

    digitalWrite(3, LOW);

    analogWrite(9, PID);

}

if(PID<0)

{

    PID = -1 * PID;

    direccion = 2;

```

```

digitalWrite(3, HIGH);

digitalWrite(2, LOW);

analogWrite(9, PID);

}

if(PID==0)

{

  direccion = 0;

  PID=0;

  digitalWrite(2, LOW);

  digitalWrite(3, LOW);

  analogWrite(9, PID);

}

}

// Eje X

if(eje == 2)

{

  PID = ErrorX[0]*PTerm; // start with proportional gain

  Accumulator += ErrorX[0]; // accumulator is sum of errors

  PID += ITerm*Accumulator; // add integral gain and error accumulation

  PID += DTerm*(ErrorX[0]-ErrorX[9]); // differential gain comes next

  PID = PID >> Divider; // scale PID down with divider

  if(PID>70)

  {

    PID=70;

```



```
}  
  
if(PID<-70)  
{  
    PID=-70;  
}  
  
if(PID>0)  
{  
    direccion = 1 ;  
    PID = PID;  
    digitalWrite(5, HIGH);  
    digitalWrite(4, LOW);  
    analogWrite(11, PID);  
}  
if(PID<0)  
{  
    PID = -1 * PID;  
    direccion = 2;  
    digitalWrite(4, HIGH);  
    digitalWrite(5, LOW);  
    analogWrite(11, PID);  
}  
if(PID==0)  
{  
    direccion = 0;  
    PID=0;
```

```
digitalWrite(4, LOW);  
digitalWrite(5, LOW);  
analogWrite(11, PID);  
}
```

```
}
```

```
}
```

# ANEXO D. Lectura de parámetros con Lab-View



Serial Settings Number of Bytes at Serial Port: 0

VISA resource name: COM1

trama a mandar: [ ]

Monitor Serial: [ ]

trama 2: [ ]

trama 3: [ ]

trama 4: [ ]

trama 5: [ ]

trama 6: [ ]

trama 7: [ ]

trama 8: [ ]

trama 9: [ ]

trama 10: [ ]

trama 11: [ ]

Horizontal 2: 0

Vertical 2: 0

Horizontal\_Deseado: 0

Vertical\_Deseado: 0

Voltaje Actual: 0

Voltaje Deseado: 0

T.1: 0

T.2: 0

T.3: 0

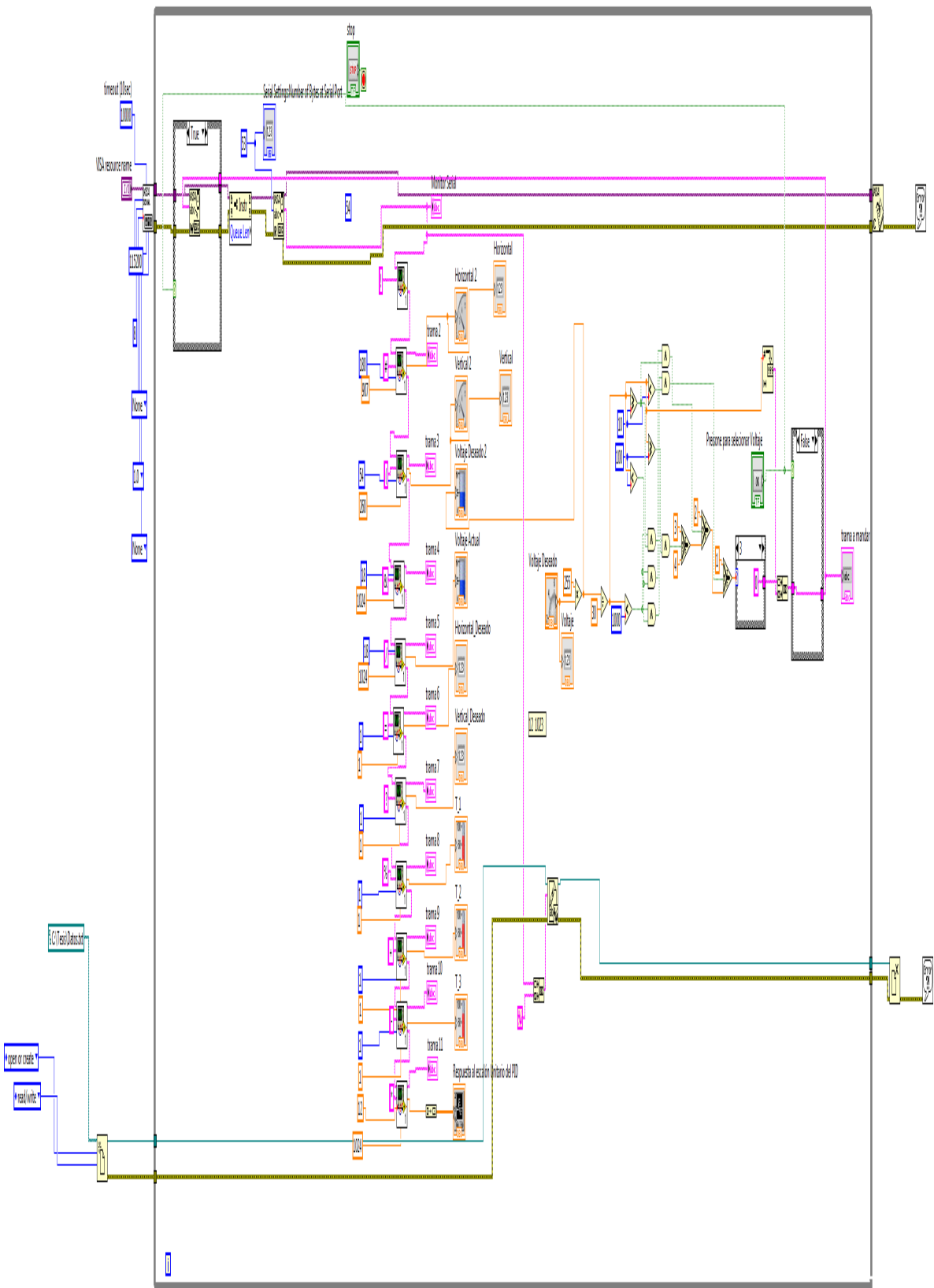
Resposta al escalón Unitario del PID

Plot 0

Amplitude vs Time

Voltaje Deseado 2: 0

Preione para seleccionar Voltaje: [ ]



## ANEXO E PONENCIAS



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE PUEBLA**



Puebla, Pue., a 17 de mayo de 2012

A quien corresponda

Por este medio hago constar que, los profesores Miguel Ángel Domínguez Ramírez y Juan Pedro Cervantes de la Rosa, realizaron el proyecto "propuesta de sistema fotovoltaico para una vivienda", y está documentado en un informe técnico

Sin otro particular y agradeciéndole de antemano su atención a la presente me es grato quedar de Usted.

ATENTAMENTE  
"EDUCACIÓN TECNOLÓGICA PARA EL PROGRESO SOCIAL"

ING. MARCOS ESPINOSA MARTÍNEZ  
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE AUTOMATIZACIÓN Y ENERGÍAS



Antiguo Camino a La Resurrección No. 1002-A, Zona Industrial Oriente C.P. 72300 Puebla, Pue.  
Tel: (01-222) 309.88.18, 309.88.42  
E-mail: rector@utpuebla.edu.mx - www.utpuebla.edu.mx



OTORGA EL PRESENTE

# Reconocimiento

A

*Ing. Juan P. Cervantes de la Rosa*

*POR SU AMABILISIMA PARTICIPACION EN LA:*

**VIGESIMAQUINTA REUNION INTERNACIONAL DE VERANO DE POTENCIA,  
APLICACIONES INDUSTRIALES Y EXPOSICION INDUSTRIAL**

**RVP-AI / 2012**

**EL IEEE SECCION MEXICO EN APOYO DEL CAMBIO TECNOLOGICO**

*CON LA PONENCIA:*

**ENERGIA FOTOVOLTAICA CAMPAMENTO MINERO  
SAN RAMON SIERRA DE DURANGO**

**ING. ROMAN RAMIREZ RODRIGUEZ**  
PRESIDENTE  
IEEE SECCION MEXICO

8 al 14 de Julio 2012

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC**



OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

A

*Ing. Juan P. Cervantes de la Rosa*

POR SU AMABILISIMA PARTICIPACION EN LA:


**Vigésimasexta Reunión Internacional de Verano de Potencia,  
Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial**

## RVP-AI / 2013

EL IEEE SECCION MEXICO, EN APOYO DE LOS  
NUEVOS HORIZONTES TECNOLOGICOS

CON LA PONENCIA:

**MODELO DE ENERGIA SEGUIDOR SOLAR HIBRIDO**

  
**ING. JUAN BAUTISTA FLORES**  
PRESIDENTE IEEE SECCION MEXICO  
7 AL 13 DE JULIO 2013, ACAPULCO, GUERRERO

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.**





OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

A

*Ing. Juan P. Cervantes de la Rosa*

POR SU AMABILISIMA PARTICIPACION EN LA:

**Vigésimasexta Reunión Internacional de Verano de Potencia,  
Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial**

## RVP-AI / 2013

EL IEEE SECCION MEXICO, EN APOYO DE LOS  
NUEVOS HORIZONTES TECNOLOGICOS

CON LA PONENCIA:

**EQUIPO DIDACTICO PARA LA MEDICION DE LA EFICIENCIA  
DE CELDAS FOTOVOLTAICAS**



**ING. JUAN BAUTISTA FLORES**

PRESIDENTE IEEE SECCION MEXICO

7 AL 13 DE JULIO 2013, ACAPULCO, GUERRERO

---

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.





OTORGA EL PRESENTE

# RECONOCIMIENTO

A

ING. JUAN CERVANTES DE LA ROSA

*POR SU AMABILISIMA PARTICIPACION EN LA:*

**Vigesimaseptima Reunión Internacional de Verano de Potencia,  
Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial**

## **RVP-AI / 2014**

**NUEVOS HORIZONTES  
PARA EL SECTOR ELECTRICO**

*CON LA PONENCIA:*

ENERGIA FOTOVOLTAICA AISLADA CABAÑA RURAL UBICADA  
COLINDANCIA CON HACIENDA SAN DIEGO LA BLANCA, ATLIXCO, PUEBLA

  
**ING. JUAN BAUTISTA FLORES**  
PRESIDENTE IEEE SECCION MEXICO  
20 AL 26 DE JULIO 2014, ACAPULCO, GUERRERO

---

**THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC.**



Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente A.C.  
Registro RENIECYT No 2011/14658 a cargo del CONACYT

---

**2° CONGRESO SOBRE TECNOLOGÍA, EDUCACIÓN Y SOCIEDAD  
CTES2013**

Punto de encuentro de Hispanoamérica

**CERTIFICADO**

Otorgado a; **Juan Pedro Cervantes de la Rosa**

Por su participación en calidad de **PONENTE** con el trabajo  
titulado; **CONTROL PID DE SEGUIDOR SOLAR HIBRIDO.**

Presentado en el congreso sobre Tecnología, Educación y Sociedad  
CTES2012. Organizado por el Centro de Estudios e Investigaciones para el  
Desarrollo Docente, CENID A.C. celebrado los días 21 al 25 de Enero 2013.

Guadalajara, Jalisco, México a 25 de Enero del 2013.

**Cenid**  
Centro de Estudios e Investigaciones para el Desarrollo Docente A.C.

Dr. Francisco Santillán Campos  
Presidente Comité Organizador CTES2013