



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

*“Medición de la eficiencia energética de los paneles  
solares de silicio.”*

**Tesis que como requisito para obtener el grado de**

**Maestro en Energías Renovables presentan:**

*Norma Rosario Flores Rivera*

*Miguel Ángel Domínguez Ramírez*

**Director de Tesis:**

**Dr. Rafael Ramírez Bon**

## Contenido

INTRODUCCIÓN.....	7
ANTECEDENTES .....	9
OBJETIVO GENERAL.....	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
JUSTIFICACIÓN.....	13
METODOLOGÍA.....	14
CAPÍTULO I.....	15
1. CONCEPTOS Y PARÁMETROS DE RADIACIÓN SOLAR.....	15
1.1 El sol. ....	15
1.1.1 Características físicas.....	15
1.1.2 Distribución espectral de la radiación solar.....	16
1.2 Efecto atmosférico sobre la radiación solar.....	18
1.2.1 Irradiancia y Constante solar.....	18
1.2.2 Componentes de la radiación en superficie. ....	19
1.2.3 Masa de aire.....	22
1.3 Medida de la radiación solar. ....	24
1.3.1 Instrumentos para la medida de la irradiancia.....	25
1.3.2 Instrumentos para la medida de las horas de radiación directa. ....	25
1.4 Posición del sol.....	26
1.4.1 Geometría del movimiento del Sol.....	27
1.4.2 Cálculo de las coordenadas horarias.....	30
1.4.3 Cálculo de las coordenadas horizontales.....	32

1.4.4 Diagramas de la trayectoria solar .....	33
.....	34
1.5 Irradiación extraterrestre horizontal. ....	35
1.5.1 Insolación máxima.....	35
1.5.2. Irradiación extraterrestre en el plano horizontal. ....	35
1.6 Calculo de sombras.....	36
.....	38
1.7 Irradiancia en un captador.....	38
1.7.1 Angulo de incidencia.....	39
1.7.2 Irradiancia en el plano inclinado.....	40
1.8 Irradiación en un captador.....	42
1.8.1. Irradiación mensual en planos inclinados.....	42
1.8.2 Orientación e inclinación optima de los captadores.....	43
CAPÍTULO 2 .....	44
2. CELDAS Y MÓDULOS FOTOVOLTAICOS .....	44
2.1 Introducción a las celdas fotovoltaicas.....	44
2.2 Fundamentos de las celdas solares .....	46
2.2.1 Absorción de la luz y efecto fotovoltaico.....	46
2.3 Características eléctricas de las celdas fotovoltaicas.....	48
2.3.1 Parámetros de funcionamiento. ....	50
2.4 Efectos de la irradiancia y temperatura.....	52
2.5 Funcionamiento de los módulos fotovoltaicos. ....	55
CAPÍTULO 3 .....	58
3. Diseño Mecánico.....	58

3.1	Introducción .....	58
CAPÍTULO 4	.....	66
4.	Programación y Electrónica.....	66
4.1	Introducción .....	66
4.2	Lenguaje de programación.....	66
4.2.1	Entorno de programación.....	67
4.3	Diseño de control módulo “Medición de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto” .....	69
4.3.1	Herramientas de programación.....	69
4.3.2	Descripción de la estrategia para la medición de voltaje y corriente. ....	71
4.3.3	Prueba de funcionamiento .....	72
CAPÍTULO 5	.....	74
5.	Pruebas y Resultados .....	74
5.1	Pruebas.....	74
5.1.1	Prueba de eficiencia del panel solar.....	74
5.1.2	Medición de la eficiencia del panel solar seguidor y fijo.....	76
5.1.3	Medición de la eficiencia en un día nublado .....	79
5.2	Conclusiones .....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	.....	84

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Relación de tamaños tierra-sol	15
Ilustración 2 Distribución Espectral de un cuerpo negro a 5900 K	17
Ilustración 3 Atenuación de la radiación por la atmósfera.	20
Ilustración 4 Definición del concepto de Masa de Aire	23
Ilustración 5 Distribución espectral de la radiación solar.	23
Ilustración 6 Radiación solar exterior a la atmósfera y en superficie según región del espectro	24
Ilustración 7 Movimiento de rotación de la tierra alrededor del sol.	27
Ilustración 8 Trayectoria solar sobre el plano del observador.	28
Ilustración 9 Coordenadas celestes horarias.	29
Ilustración 10 Coordenadas celestes horizontales.	30
Ilustración 11 Ecuación de tiempo	32
Ilustración 12 Diagrama polar de la trayectoria solar.	34
Ilustración 13 Diagrama rectangular de la trayectoria solar.	34
Ilustración 14 Esquema de cálculos de sombra	37
Ilustración 15 Diagrama polar de la trayectoria solar con la proyección de sombras sobre éste.	38
Ilustración 16 Sombreado entre colectores.	38
Ilustración 17 Definición del ángulo de incidencia sobre un plano inclinado y orientado	40
Ilustración 18 Mercado de las celdas fotovoltaicas.	45
Ilustración 19 Efecto Fotoeléctrico	46
Ilustración 20 Circuito Equivalente de una Celda Solar	50
Ilustración 21 Curva característica I-V de una Celda Solar	51
Ilustración 22 Dependencia de las curvas I-V de una celda fotovoltaica con la irradiancia solar	53
Ilustración 23 Variación de la curva característica potencia-tensión de una celda solar fotovoltaica	53
Ilustración 24 Potencia generada proporcional a la irradiancia.	54
Ilustración 25 Efecto de la temperatura sobre la curva I-V.	55
Ilustración 26 Variación de las principales magnitudes eléctricas de una celda solar fotovoltaica en función de la temperatura.	55
Ilustración 27 Panel solar de silicio	56
Ilustración 28 Datos técnicos panel solar	57
Ilustración 29 Cuerda “Acme”, y tuerca con juego cero	58
Ilustración 30 Detalle de la transmisión del motor y el tornillo Acme	59
Ilustración 31 Movimiento del eje que controla la altura solar	59
Ilustración 32 Dimensiones del modelo	60
Ilustración 33 Cálculo de los ángulos	61
Ilustración 34 Altura solar de 60°	61
Ilustración 35 Cálculo de la distancia del tornillo	62
Ilustración 36 Encoder del motor	63

Ilustración 37 Diseño para el recorrido de la polea	64
Ilustración 38 Diseño del prototipo	65
Ilustración 39 Panel frontal	67
Ilustración 40 Diagrama de bloques	68
Ilustración 41 Programación de un ciclo “FOR”	69
Ilustración 42 Conjunto de herramientas de la tarjeta USB 4704	69
Ilustración 43 Herramientas de programación de entradas analógicas	70
Ilustración 44 Herramientas de programación de entradas y salidas digitales	70
Ilustración 45 Estrategia de medición de señales	71
Ilustración 46 Panel frontal del módulo	72
Ilustración 47 Archivo de salida de datos	73
Ilustración 48 Panel frontal de la adquisición	73

### Índice de Tablas

Tabla 1 Albedo de diferentes superficies .....	21
Tabla 2 Irradiancia global y difusa en diferentes condiciones. ....	21
Tabla 3 Tabla datos técnicos .....	57
Tabla 4 Eficiencia de panel solar de silicio .....	75

### Índice de Gráficas

Gráfica 1 Comparación del voltaje sistemas móvil y fijo	76
Gráfica 2 Comparación de corrientes de corto circuito	77
Gráfica 3 Comparación de potencia generada	77
Gráfica 4 Comparación de temperaturas	78
Gráfica 5 Comparación de la eficiencia	78
Gráfica 6 Comparativa de voltajes	79
Gráfica 7 Comparativa de corrientes.	80
Gráfica 8 Comparativa de potencias de un sistema móvil y fijo.	80
Gráfica 9 Comparativo de temperaturas.	81
Gráfica 10 Irradiancias	81
Gráfica 11 Comparativo de la eficiencia del sistema móvil y fijo.	82

## INTRODUCCIÓN

Un panel fotovoltaico es un conjunto interconectado de celdas solares y es el componente básico de un sistema fotovoltaico. Un panel o módulo fotovoltaico se compone de una parte frontal transparente, con un perfil de goma, un vidrio frontal, un material de incrustamiento, encapsulado, celdas solares y lámina posterior. Está enmarcado con un marco de aluminio anodizado, en ocasiones con un acero inoxidable o con un marco de plástico. El material de la parte delantera (superestrato) es generalmente baja en hierro y el vidrio templado. Los materiales posteriores comúnmente utilizados (sustratos) son EVA (etileno-vinilo-acetato) y PVB (polivinilo butiral). De acuerdo con la tecnología utilizada en las celdas solares, los paneles fotovoltaicos están clasificados como monocristalinos, policristalinos y paneles solares amorfos, y estos últimos también se conocen como paneles de película delgada (Thin film) o capa fina.

El rendimiento de un panel fotovoltaico es generalmente medido en condiciones standard de ensayo (Standard Test Conditions o STC): radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  (incidencia normal), distribución espectral AM 1.5 y temperatura de la célula a  $25^\circ \text{C}$ .

La medida más interesante es la eficiencia del panel, o qué porcentaje de energía de la luz que incide en el panel se convierte en electricidad. La eficiencia de la celda solar no es igual a la eficiencia del panel. La eficiencia del panel es generalmente de 1 a 3% inferior a la eficiencia de las celdas solares debido a la reflexión de vidrio, marco de sombra, las temperaturas más altas, etc.

Los paneles solares soportan el calor, el frío, lluvia y granizo durante muchos años. Los módulos fotovoltaicos de silicio cristalino garantizan una producción eléctrica durante 10 años en el 90% de la producción de potencia nominal y 25 años en un 80%.



## ANTECEDENTES

El uso de la energía solar ha sido utilizada desde hace muchos años con diferentes objetivos como: en la agricultura, hornos solares o para generar vapor para maquinaria, calefacción, entre muchos otros ejemplos. Pero el científico francés Alexandre Edmon Becquerel, experimentando con una pila electrolítica sumergida en una sustancia de las mismas propiedades, observo que después al exponerla a la luz generaba más electricidad, así fue que descubrió el "efecto fotovoltaico" en 1839 que consiste en la conversión de la luz del sol en energía eléctrica.

En 1885 el profesor W. Grylls Adams experimento con el selenio (elemento semiconductor) como reaccionaba con la luz y descubrió que se generaba un flujo de electricidad conocida como "fotoeléctrica".

Charles Fritts en 1893, fue quien invento la primera celda solar, conformada de láminas de revestimiento de selenio con una fina capa de oro, estas celdas se utilizaron para sensores de luz en la exposición de cámaras fotográficas.

Albert Einstein investigo más a fondo sobre el efecto fotoeléctrico y descubrió que al iluminar con luz violeta (que es de alta frecuencia) los fotones pueden arrancar los electrones de un metal y producir corriente eléctrica. Esta investigación le permitió ganar el Premio Nobel de Física en 1921.

El inventor estadounidense Russel Ohl, creo patentó las primeras celdas solares de silicio en 1946, pero Gerald Pearson de Laboratorios Bells, por accidente,

experimentando en la electrónica creo una celda fotovoltaica más eficiente con silicio, gracias a esto Daryl Chaplin y Calvin Fuller mejoraron estas celdas solares para un uso más práctico. Empezaron la primera producción de paneles solares en 1954, que se utilizaron en su mayoría en satélites espaciales. En los 70's el primer uso general para el público, de los paneles solares fue con calculadoras que se siguen utilizando actualmente.

Las primeras observaciones de fenómenos que relacionan luz y electricidad datan de principios del siglo XIX. A lo largo de ese mismo siglo se describieron diferentes relaciones entre la luz y la electricidad: El efecto fotoemisor, consiste en la emisión de cargas por un metal iluminado, el efecto fotoconductor, que describe la variación en la conductividad eléctrica de un metal al ser iluminado y el efecto fotovoltaico, en el cual se genera una fuerza electromotriz en el metal, descrito por Becquerel en 1839.

Los trabajos en el efecto fotovoltaico llevaron a Chapin, Fueller y Pearson a desarrollar, en 1954, en los laboratorios Bell, la primera celda solar capaz de convertir radiación solar en energía eléctrica. También en ese mismo año se comenzaron a fabricar con éxito las primeras celdas solares de capa delgada, mediante la realización de contactos de diversos metales con SCd.

La materia base de las celdas son los materiales semiconductores también utilizados en otros dispositivos como diodos, transistores y circuitos integrados. Actualmente existe una amplia gama de celdas que utilizan diferentes materiales y estructuras; el objetivo perseguido es obtener la máxima eficiencia al mínimo coste.

La comprensión de los factores que limitan la conversión de energía solar en eléctrica ha permitido el cálculo de los límites máximos para la eficiencia de conversión de las celdas solares. La teoría más simple y completa ha sido llamada teoría del balance detallado, desarrollada por Shockley y Queisser, la cual establece que la corriente producida por una celda solar está determinada por la diferencia entre el número de fotones absorbidos y el de aquellos emitidos por el mismo dispositivo. Puesto que los fotones absorbidos determinan la fotocorriente, mientras que los emitidos están relacionados con el voltaje de operación, es posible determinar la curva corriente – voltaje de una celda y, por lo tanto, obtener todos sus parámetros importantes.

De acuerdo con esta teoría ha sido posible calcular que la máxima eficiencia esperada para silicio es del orden 30% a 31% bajo radiación de un cuerpo negro a 6000 K, o radiación solar AM 1.5, respectivamente. Por otro lado, en los últimos años se han hecho celdas de silicio con eficiencias del orden del 24% (bajo el espectro AM 1.5); o sea, cada vez más cercanas al límite superior.

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo, que sea capaz de medir las características eléctricas de módulos fotovoltaicos de silicio, así como determinar la eficiencia para trazar las curvas de comportamiento, en condiciones normales de operación.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un prototipo de medición para medir las características de celdas solares y trazar las curvas de comportamiento.
- Obtener datos de prueba de campo para módulos fotovoltaicos en la localidad
- Analizar e interpretar las curvas de comportamiento y eficiencia de las celdas solares de silicio, para determinar parámetros a medir.

## JUSTIFICACIÓN

Hoy en día el consumo de energía se ha vuelto un factor básico para muchos aspectos de la actividad y el progreso. Por ende, las energías son imprescindible para el progreso de un país, tanto es así que la tasa de consumo energético está relacionado con el grado de desarrollo económico. Esta es la razón por la cual las energías renovables, o verdes, están siendo muy demandadas ya que su utilización no produce emisiones contaminantes para el medio ambiente.

Estos hechos han provocado un gran interés por parte de la Universidad Tecnológica de Puebla / Tehuacán por medir la eficiencia de las celdas solares de silicio mediante el estudio de los factores medioambientales predominantes en la región de Puebla, debido a que estos elementos juegan un papel importante en el comportamiento energético de las celdas solares de silicio.

Ambas universidades cuentan con el programa de Ing. en Energías Renovables por lo que es importante la formación de recursos humanos así como el equipamiento de los talleres para fortalecer la educación de los alumnos.

En el mercado existen equipos semejantes que realizan estas funciones, como el que se encuentra en la Universidad Tecnológica de Tehuacán, sin embargo el costo es elevado, y de arquitectura cerrada.

No existe para la ciudad de Puebla y Tehuacán datos sobre los niveles de irradiación, por lo que se es necesario para futuros diseños de sistemas fotovoltaicos.

## METODOLOGÍA

- 1.- Recopilación de información acerca de la geometría del sol, módulos fotovoltaicos.
- 2.- Selección, adquisición y conocimiento de módulo de adquisición de datos e integración al software de adquisición de datos.
- 3.- Diseño y construcción mecánico del prototipo
- 4.-Selección y adquisición de interfaces de potencia para servomotores
- 5.- Programación del software de adquisición para el control de motores
- 6.- Pruebas de del sistema de posicionamiento
- 7.- Acondicionamiento de señales voltaje, corriente y temperatura.
- 8.- Pruebas de adquisición de datos
- 9.- Diseño de experimento para el trazo de curvas y realización
- 10.- Diseño de experimento para la medición de eficiencia y realización
- 11.-Análisis de curvas y comparación, con datos de fabricante
- 12.- Medición de datos por periodos de tiempo
- 13.- Conclusiones

# CAPÍTULO I

## 1. CONCEPTOS Y PARÁMETROS DE RADIACIÓN SOLAR

### 1.1 El sol.

El sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares. La energía irradiada por el sol procede de la fusión de átomos de deuterio para dar átomos de helio. El astro irradia en un segundo más energía que la consumida por la humanidad en toda su historia. Una parte de esta energía llega a la tierra en forma de radiación electromagnética. La tierra recibe en el exterior de su atmosfera una potencia total de  $1.73 \times 10^{14}$  Kw. Bajo la perspectiva humana, la fuente energética solar puede considerarse como inagotable.

#### 1.1.1 Características físicas.

El sol es una inmensa esfera de gases a alta temperatura, de  $1.39 \times 10^9$  m de diametro y situado a la distancia media de  $1.5 \times 10^{11}$  m de la Tierra, unos 8 minutos de viaje a la velocidad de la luz (Ilustración 1). Para un observador terrestre el disco solar subtende un Angulo de aproximadamente 32 minutos. Visto desde la tierra el Sol rota alrededor de su eje una vez cada cuatro semanas. La edad estimada de la estrella es de 5 mil millones de años, restándole otros 8 mil millones de años más de vida.

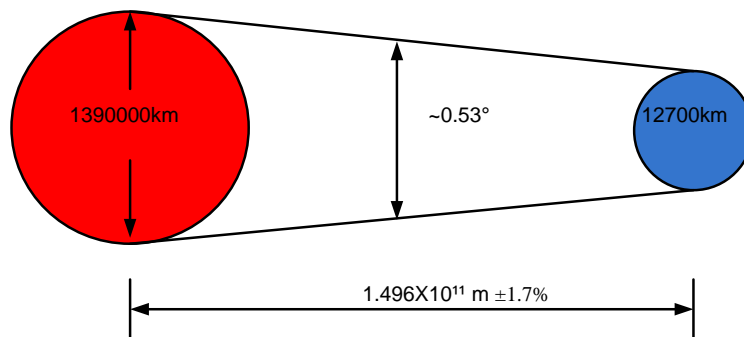


Ilustración 1 Relación de tamaños tierra-sol

El núcleo solar es la región comprendida dentro del 23% de su radio, a partir del centro. Este corresponde a tan solo el 15% del volumen pero contiene el 40% de la masa y genera el 90% de la energía. En esta región la temperatura es del orden de  $10^7$  K y la densidad de  $10^5 \text{ kg m}^{-3}$ . A una distancia del 70% del radio solar, la temperatura es de unos  $10^5$  K y la densidad  $70 \text{ kg m}^{-3}$ . La zona que comprende desde el 70% al 100% del radio solar, se conoce como zona convectiva y su temperatura cae hasta valores entre 5,000 y 6,000 K, mientras que la densidad desciende a  $10^{-5} \text{ kg m}^{-3}$ .

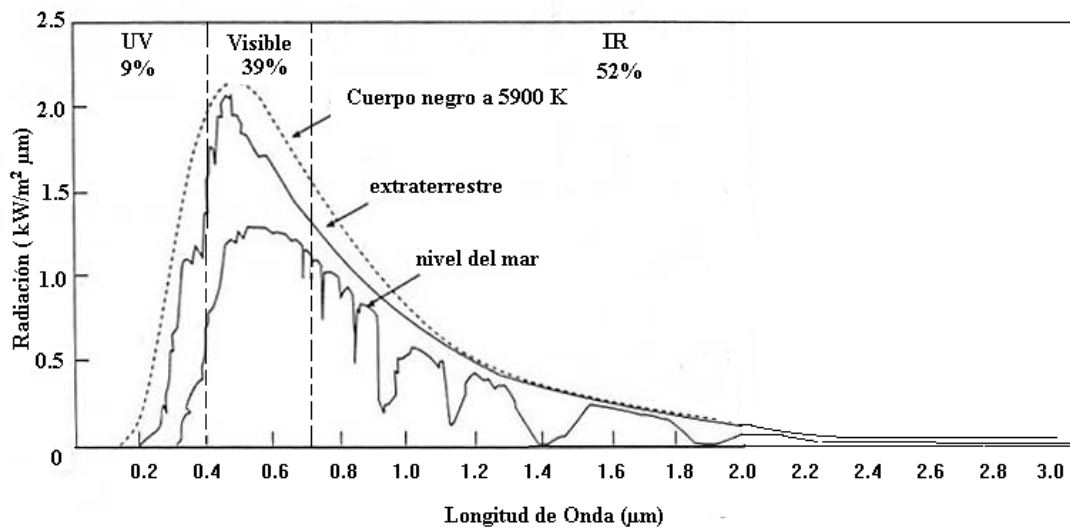
La capa externa de esta región recibe el nombre de fotosfera y es considerada como la superficie del Sol, por ser esta una región opaca, desde donde se emite la gran mayoría de la radiación solar hacia el espacio. La fotosfera es la superficie aparente del Sol cuando se observa con un filtro adecuado. Sin embargo, como todo el Sol desde el núcleo hasta su superficie se encuentra en forma gaseosa, no hay una superficie física claramente definida, como la hay en la Tierra. Sobre la fotosfera existen también gases, en condiciones tales que son esencialmente transparentes, constituyen la corona solar, observable durante los eclipses totales de Sol. La corona solar es la atmósfera del Sol. De forma similar a como sucede en la atmósfera terrestre, la corona es cada vez más tenue a medida que se está a mayor distancia del núcleo solar, hasta confundirse con el vacío relativo que existe en el espacio interestelar.

### 1.1.2 Distribución espectral de la radiación solar

El sol emite radiación en toda la gama del espectro electromagnético, desde los rayos gamma hasta las ondas de radio. Pero debido al efecto de la fotosfera, que se encuentra próxima a los 6,000 K, el flujo de energía emitido por el Sol corresponde al de



un cuerpo a esa temperatura. La Ilustración 2 muestra la energía emitida por un cuerpo negro a 6,000 K en las diferentes longitudes de onda según expresa matemáticamente la Ley de Planck. Esta distribución espectral hace que se considere que la radiación solar, o de onda corta, procedente del Sol tiene longitudes de entre  $0.3\mu\text{m}$  y  $4\mu\text{m}$ , aun cuando se reciben pequeñas cantidades de energía en otras ondas del espectro. La radiación emitida desde el núcleo del Sol está localizada en la zona del espectro correspondiente a los rayos gamma y rayos X. Aumentando la longitud de onda a medida que la temperatura desciende al alejarnos del núcleo solar.



*Ilustración 2 Distribución Espectral de un cuerpo negro a 5900 K*

El máximo de emisión de un cuerpo negro se desplaza hacia longitudes de onda mayores a medida que disminuye su temperatura, según predice la Ley de Wien. Las ondas electromagnéticas que transportan mayor cantidad de energía proveniente del Sol

tiene una longitud de onda aproximada de  $0.55 \mu\text{m}$ . Es por ello que casi la mitad de la energía solar que recibimos se encuentra en la región visible del espectro.

## 1.2 Efecto atmosférico sobre la radiación solar

La distribución temporal de la energía solar que alcanza la superficie es muy irregular. No solamente varia la insolación máxima diaria (horas en las que el Sol está por encima del horizonte del lugar) sino que la radiación solar es más o menos atenuada según la composición instantánea de la atmosfera que atraviesa. En término medio solo el 47% de la radiación incide sobre la atmosfera terrestre alcanza la superficie del planeta. El 31% lo hace directamente y el otro 16% después de ser dispersada por polvo en suspensión, vapor de agua y moléculas de aire. La energía restante, un 53% es reflejada hacia el espacio exterior o absorbida en la atmosfera.

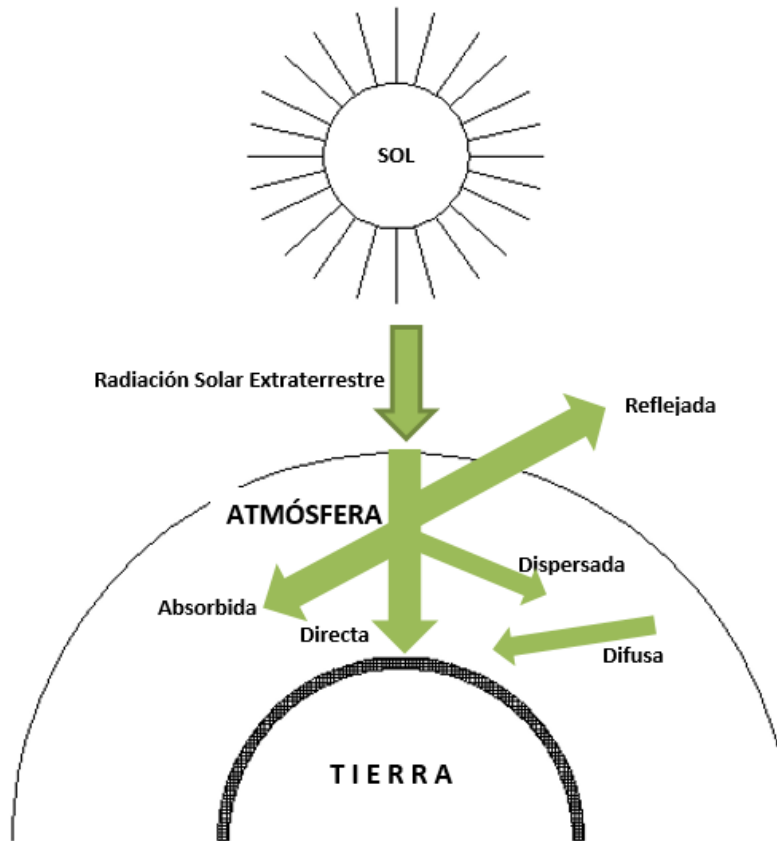
### 1.2.1 Irradiancia y Constante solar

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como irradiancia ( $I_S$ ) y se expresa en  $Wm^{-2}$ . Para una distancia media Tierra-Sol el valor de la irradiancia en un plano exterior a la atmosfera y perpendicular a los rayos del Sol se conoce como Constante Solar ( $S_S$ ). El valor determinado por la NASA indica que la constante solar es  $1.353 Wm^{-2} (\pm 1.6\%)$ . Un estudio detallado del espectro revela que un 5% de la energía corresponde al intervalo de longitudes de onda inferiores a  $0.38\mu\text{m}$ , un 49% a longitudes de onda en el visible, entre  $0.38$  y  $0.78\mu\text{m}$  y el 46% restante a longitudes de onda superiores a las  $0.78 \mu\text{m}$ .

### 1.2.2 Componentes de la radiación en superficie.

La atmosfera terrestre está constituida por gases, nubes y partículas sólidas en suspensión. Los diversos constituyentes de la atmosfera provocan la atenuación de la radiación. A medida que la radiación solar atraviesa la masa de aire sufre procesos de absorción, reflexión y refracción. En referencia a la absorción: los rayos X y otras radiaciones de onda corta del espectro solar son absorbidos en la ionosfera por el  $N_2$  y el  $O_2$ ; la mayor parte de la radiación ultravioleta sufre el efecto del  $O_3$  y para longitudes de onda superiores a  $2.5\mu m$  se produce una fuerte absorción por el  $CO_2$  y el  $H_2O$ . El efecto atmosférico sobre la radiación se encuentra perfectamente expuesto en Liou (2002).

La irradiancia se atenúa disminuyendo su valor respecto al dado en la cima de la atmosfera. En las condiciones más óptimas en cuanto a la transmisión atmosférica la atenuación de la radiación hasta la superficie es de un 25%. Por ello una irradiancia de  $1,000 Wm^{-2}$  se utiliza como valor estándar de referencia en la ingeniería relacionada con la energía solar. A consecuencia de la interacción de la radiación solar con la atmosfera la energía que llega a la superficie tiene diferentes componentes, nombradas como la radiación directa – no ha sufrido ninguno de los citados fenómenos y llega a la superficie en la dirección del disco solar – y radiación difusa – procede del resto de direcciones de la bóveda celeste (Ilustración 3). A las componentes directa y difusa hay que añadir que un captador inclinado también puede recibir radiación previamente reflejada en el suelo. El conjunto de radiaciones que alcanza la superficie es la radiación global.



*Ilustración 3 Atenuación de la radiación por la atmósfera.*

El tanto por ciento de la energía solar que se refleja en una superficie respecto al total incidente, llamado reflectividad, depende de la longitud de onda de la radiación y de la naturaleza de la superficie. Las diferentes reflectividades en función de la longitud de onda dan lugar a la signatura espectral de una superficie. La reflectividad global considerando todo el espectro de radiación solar se conoce como albedo de la superficie (Tabla 1).

*Tabla 1 Albedo de diferentes superficies*

Nieve virgen	0.95
Agua (ángulos de incidencia grandes)	0.07
Suelos (arcillas)	0.14
Bosques de coníferas	0.07
Hojas muertas	0.30
Hierba seca	0.20
Hierba verde	0.26
Gravas	0.13
Paredes oscuras (ladrillo rojo)	0.27
Paredes claras (pinturas luminosas)	0.60

El porcentaje en la radiación global de una u otra componente depende de las condiciones meteorológicas. Cuanto más nublado es el día más importante es la radiación difusa y por el contrario en días despejados la componente directa representa el porcentaje mayoritario.

*Tabla 2 Irradiancia global y difusa en diferentes condiciones.*

Condiciones climatológicas	Irradiancia ( $Wm^{-2}$ )	Componente difusa (%)
Cielo claro	750 – 1000	10-20
Parcialmente nublado	200 – 500	20-90
Completamente cubierto	50 – 150	90-100

Un parámetro importante relacionado con la componente directa y difusa de la radiación es el índice de claridad ( $K_T$ ) se define como el porcentaje de irradiancia global en superficies respecto a la que alcanza la cima de la atmosfera en el plano horizontal. El índice de claridad tanto diario como mensual ha resultado de gran utilidad en ingeniería solar. Basándose en él se han desarrollado diversidad de aplicaciones, desde algoritmos de cálculo de la energía incidente en una superficie inclinada hasta estudios de utilizabilidad en los que se requiere un valor umbral de energía para el funcionamiento adecuado del sistema (Cufie y Becan, 199). Las funciones de densidad de probabilidad de los índices de claridad han mostrado ser universales. Los valores diarios están relacionados con el valor medio y la altura solar máxima mensuales (Ibáñez et al., 2003).

### 1.2.3 Masa de aire

Un concepto que caracteriza el efecto de una atmosfera clara sobre la radiación solar es la masa de aire, relacionado con la longitud de la trayectoria recorrida por la radiación directa hasta alcanzar la superficie. En un día claro al nivel del mar y con el Sol situado en el cenit se tiene una masa de aire de 1, abreviadamente AM1. En otros instantes, la masa de aire es  $1/\cos(\theta_z)$ , siendo  $\theta_z$  el ángulo que forma la radiación directa del Sol con la vertical del lugar (Ilustración 4). Si la presión  $p$  del medio es diferente a los 101.300 Pa que corresponde a la presión atmosférica estándar se multiplica la masa atmosférica obtenida por  $p/101.300$ .

El efecto atmosférico expresado por la masa de aire ha llevado a definir el espectro AM0, que refiere las condiciones en el exterior de la atmosfera, importante para las aplicaciones fotovoltaicas en los satélites (Ilustración 5). La distribución espectral

AM1.5 se emplea para las calibraciones y certificaciones de equipos solares. La Ilustración 6 muestra un resumen del efecto atmosférico sobre la distribución espectral de la energía solar recibida en el exterior y en superficie refiriéndose a la distribución AM1.5. La distribución de las irradiancias para la masa de aire AM1.5 viene definidas en la norma ISO 9845-1.

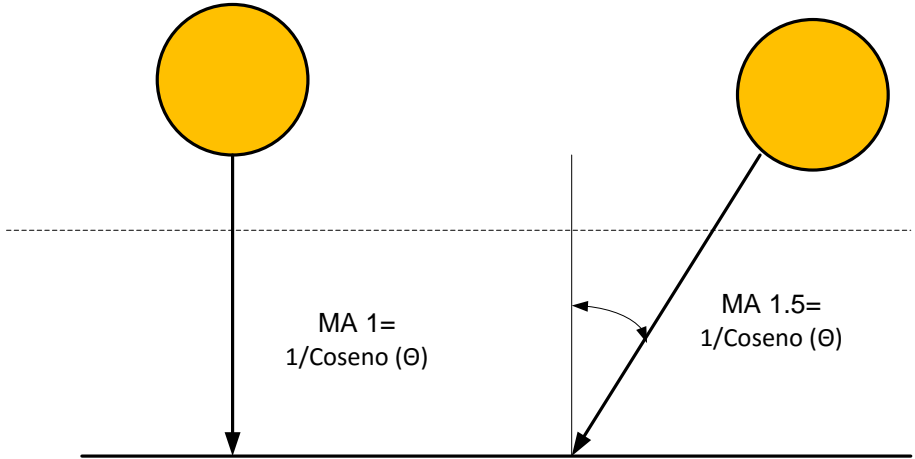


Ilustración 4 Definición del concepto de Masa de Aire

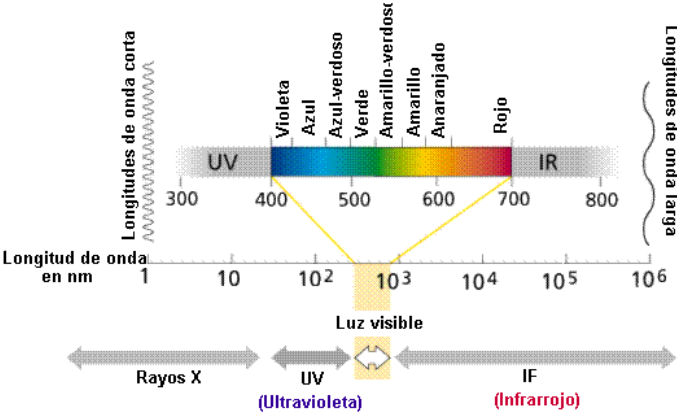
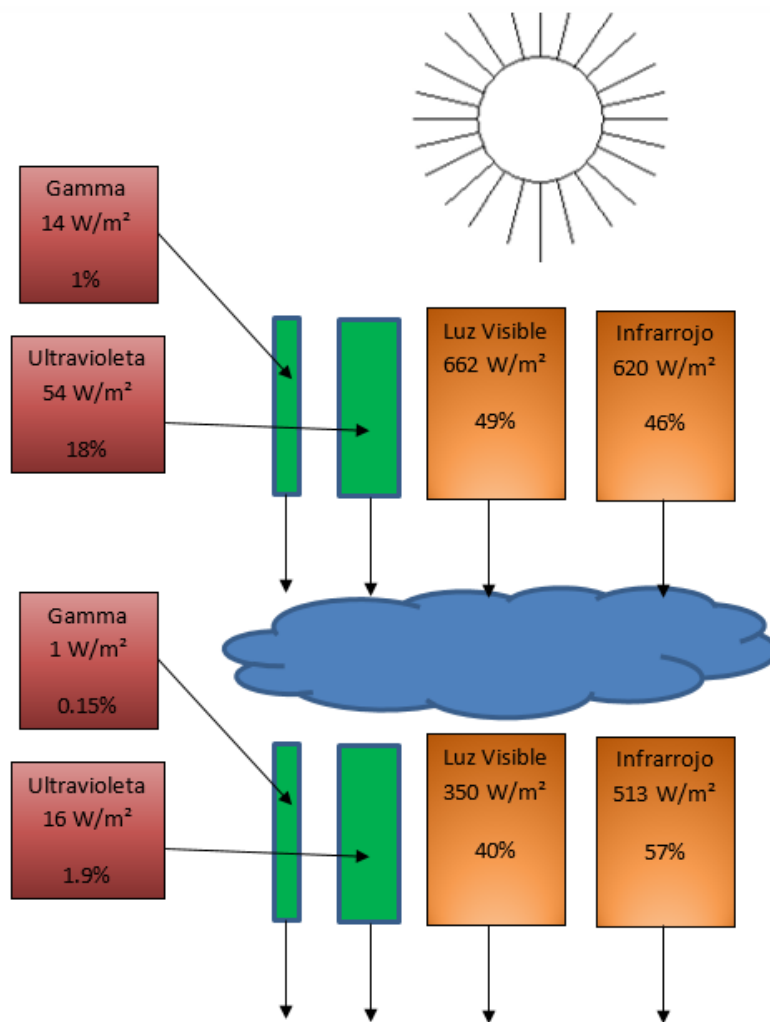


Ilustración 5 Longitud de onda de la radiación solar.



*Ilustración 6 Radiación solar exterior a la atmósfera y en superficie según región del espectro*

### 1.3 Medida de la radiación solar.

La irradiación  $H_S$  corresponde al valor acumulado de la irradiancia en un intervalo de tiempo determinado. Esta es la magnitud de mayor interés para la ingeniería solar. Las redes de estaciones meteorológicas automáticas miden la irradiancia, el valor instantáneo de la energía solar que alcanza la superficie, que es almacenada, filtrada y puesta a disposición de los usuarios como irradiación en base horaria, diaria o mensual. Cuando se



necesitan largas series de datos para diseñar sistemas solares utilizando años tipo se puede recurrir a atlas de radiación o bases de datos meteorológicos. Existe gran disponibilidad de materiales sobre irradiación e índices de claridad vía internet para muchas horas del planeta.

### 1.3.1 Instrumentos para la medida de la irradiancia

Existen dos tipos de dispositivos básicos para la medida de la radiación solar, el piranómetro y el pirheliómetro. El piranómetro recibe la radiación en todas direcciones del hemisferio y por lo tanto mide la radiación global, la adición de radiación directa o difusa incidentes en una superficie. El piranómetro se puede aplicar a la medida de la radiación difusa empleando una banda opaca que sombree el instrumento a la radiación directa. El pirheliómetro tiene una abertura colimada que restringe su visión de la bóveda celeste, habitualmente a  $5^\circ$ , y por ello se utiliza para la medida de la radiación directa enfocándolo al sol.

### 1.3.2 Instrumentos para la medida de las horas de radiación directa.

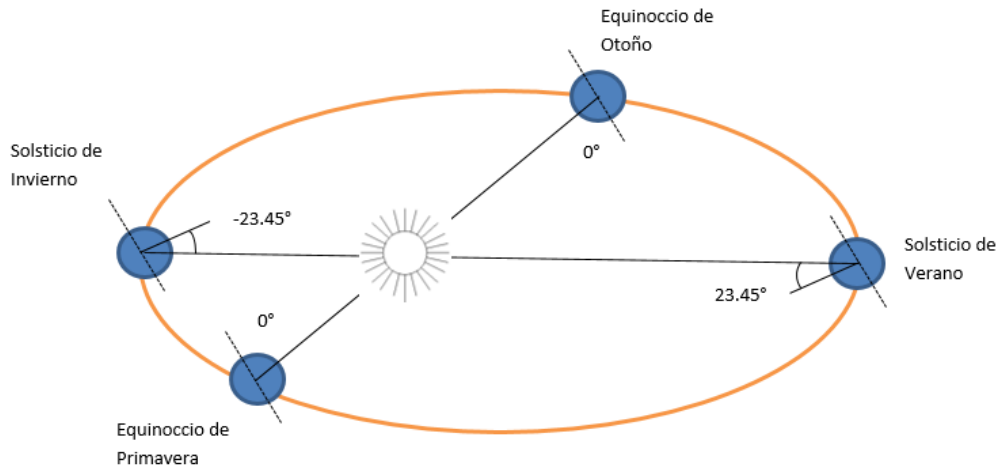
Los heliógrafos miden el intervalo de tiempo durante el cual se tiene radiación solar directa superior a un umbral de  $120 \text{ Wm}^{-2}$ . Entre los heliógrafos más utilizados están el Campbell Jordán. La duración de las horas de radiación solar directa es determinada en muchos más lugares que la irradiancia. El heliógrafo Campbell – Stoke utiliza una esfera sólida de cristal como lente para concentrar la radiación directa. Esta radiación es concentrada sobre una banda de papel tratado y grabado con una escala horaria. Cuando la irradiancia supera el valor mencionado, la energía concentrada quema el papel. La longitud quemada permite leer manualmente sobre la banda las horas de

radiación por encima del umbral. En este trabajo se midió la irradiancia con un solarímetro el cual se muestra en el anexo de este documento.

## 1.4 Posición del sol

Junto a las condiciones atmosféricas hay otro factor que determina la incidencia de la radiación sobre un 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 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 de la eclíptica. El ángulo que forma el plano de la eclíptica con el plano del ecuador varía a lo largo del año como indica la Ilustración 7. 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.

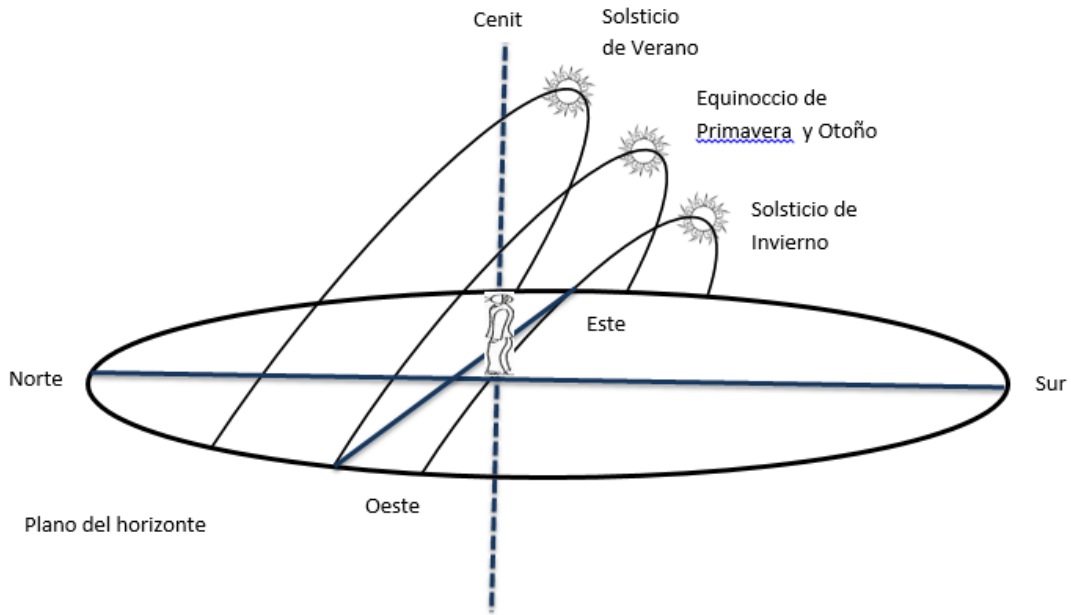


*Ilustración 7 Movimiento de rotación de la tierra alrededor del sol.*

#### 1.4.1 Geometría del movimiento del Sol.

Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie de la Tierra, el Sol parece describir un arco de círculo desde su salida (orto) hasta su puesta (ocaso) Ilustración 8. A mitad de este recorrido, al mediodía solar, se sitúa por definición el plano meridiano local. La vertical del observador sobre la superficie terrestre intersecta a la bóveda celeste en un punto llamado cenit. El eje de la Tierra forma un ángulo igual a la latitud del lugar ( $\phi$ ) con el plano del horizonte del observador.

La posición del Sol se puede referir en dos sistemas de coordenadas centradas en el observador según el sistema de referencia escogido: horarias y horizontales. Estas coordenadas determinan el vector solar entendido como un vector con origen en el observador y extremo en el Sol.



*Ilustración 8 Trayectoria solar sobre el plano del observador.*

#### A. Coordenadas horarias (Ilustración 9)

$\delta_S$ , declinación solar ( $^\circ$ ): Posición angular del Sol al mediodía solar con respecto al plano del Ecuador terrestre.

$W_S$ , ángulo horario solar ( $^\circ$ ): desplazamiento angular del Sol sobre el plano de la trayectoria solar. Se toma como origen del ángulo horario el mediodía solar y valores crecientes en el sentido del movimiento del Sol. Cada hora es igual a  $15^\circ$ .

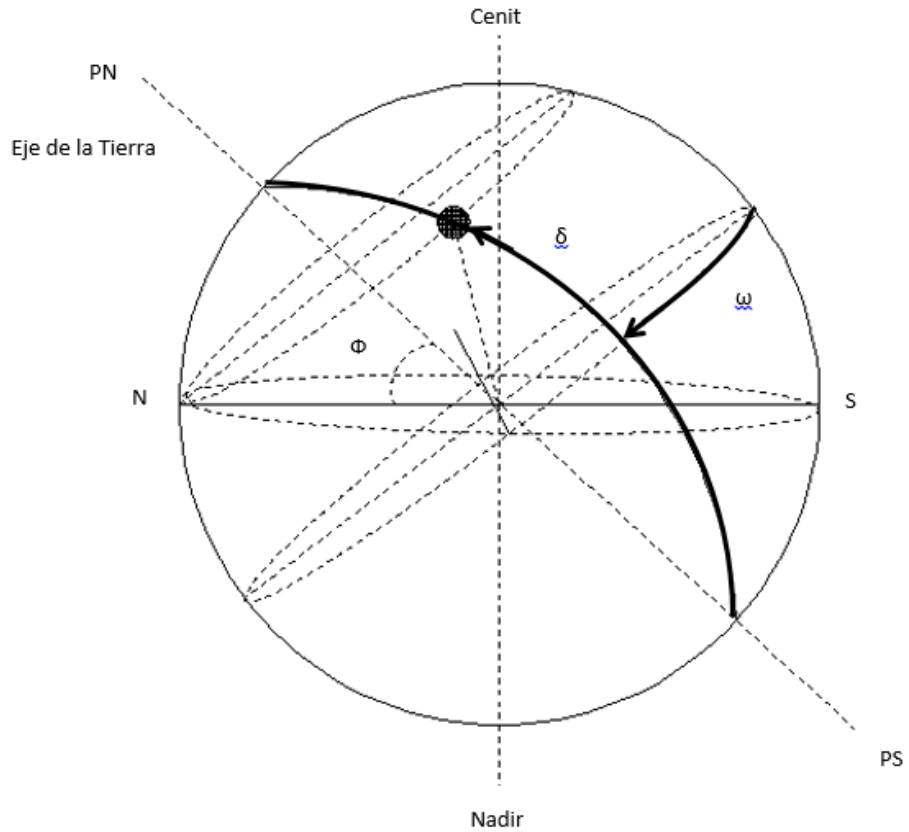
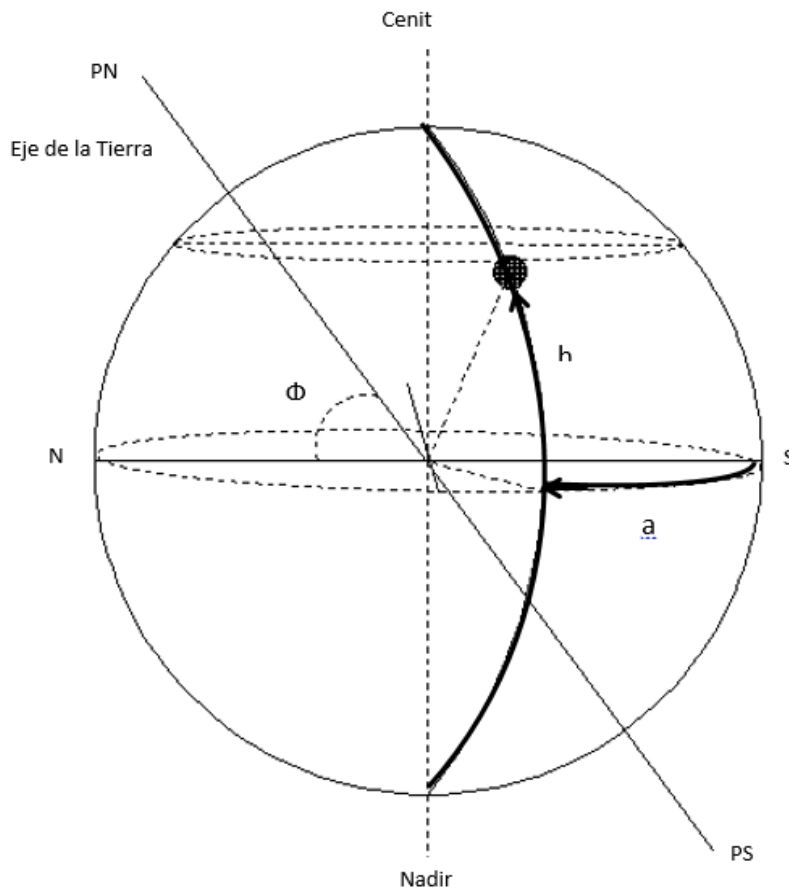


Ilustración 9 Coordenadas celestes horarias.

## B. Coordenadas horizontales ( Ilustración 10)

$h_s$ , altura solar ( $^{\circ}$ ): ángulo que forma la radiación solar directa y el plano del horizonte. El ángulo complementario es llamado ángulo cenital solar.

$a_s$ , altura solar ( $^{\circ}$ ): ángulo que forma la radiación solar directa y el meridiano del observador. Se toma como origen de acimuts el mediodía solar y valores crecientes en sentido horario observando el norte desde el sur del lugar (en el hemisferio norte).



*Ilustración 10 Coordenadas celestes horizontales.*

### 1.4.2 Cálculo de las coordenadas horarias

Las coordenadas horizontales del Sol, acimut y altura varían dependiendo de la hora del día, el día del año y la latitud del lugar. Por el contrario, las coordenadas horarias son más fáciles de obtener, la declinación solo depende del día del año y el ángulo horario de la hora. Se determinan las coordenadas horarias como paso previo para el cálculo de las horizontales.

La mayoría de los cálculos solares requieren la hora solar pero nuestros relojes indican la hora local. Para establecer husos horarios se ha convenido en fijar una misma hora civil en ciudades de diferente hora solar.

La hora solar se calcula a partir:

$$\text{hora solar} = \text{hora solar local} + 4(\text{min}/^\circ)(L_{Ref} - L_{Loc}) + \Delta t \dots\dots\dots [1.0]$$

Donde:

$L_{Ref}$ : Es la longitud geografica del meridiano de referencia ( $^\circ$ ).

$L_{Loc}$ : Es la longitud del meridiano local ( $^\circ$ ).

Una segunda corrección es necesaria debido a que el Sol se adelanta y retrasa respecto a la hora solar media. Esta corrección se conoce como ecuación de tiempo:

$$\Delta t (\text{min}) = 9.87 \text{ sen}^2 B - 7.53 \cos B - 1.5 \text{ sen } B \dots\dots\dots [1.1]$$

Siendo:

$B(^\circ) = 360 (J-81)/364$  y J el día juliano del año.

La ecuación de tiempo también puede leerse gráficamente como lo muestra la Ilustración 11.

Conocida la hora solar se calcula el ángulo horario recordando que el origen de coordenadas se encuentra en el meridiano local y que 1 hora solar corresponde a  $15^\circ$ :

$$\omega_s = \frac{(\text{hora solar} - 12 \text{ h})}{15^\circ} \dots\dots\dots [1.2]$$

El ángulo horario resulta negativo por las mañanas y positivo por las tardes. Por otra parte, la declinación del Sol depende del día del año según la expresión:

$$\delta_s = 23.45^\circ \operatorname{sen} \left( 360 \frac{284 + J}{365} \right) \dots \dots [1.3]$$

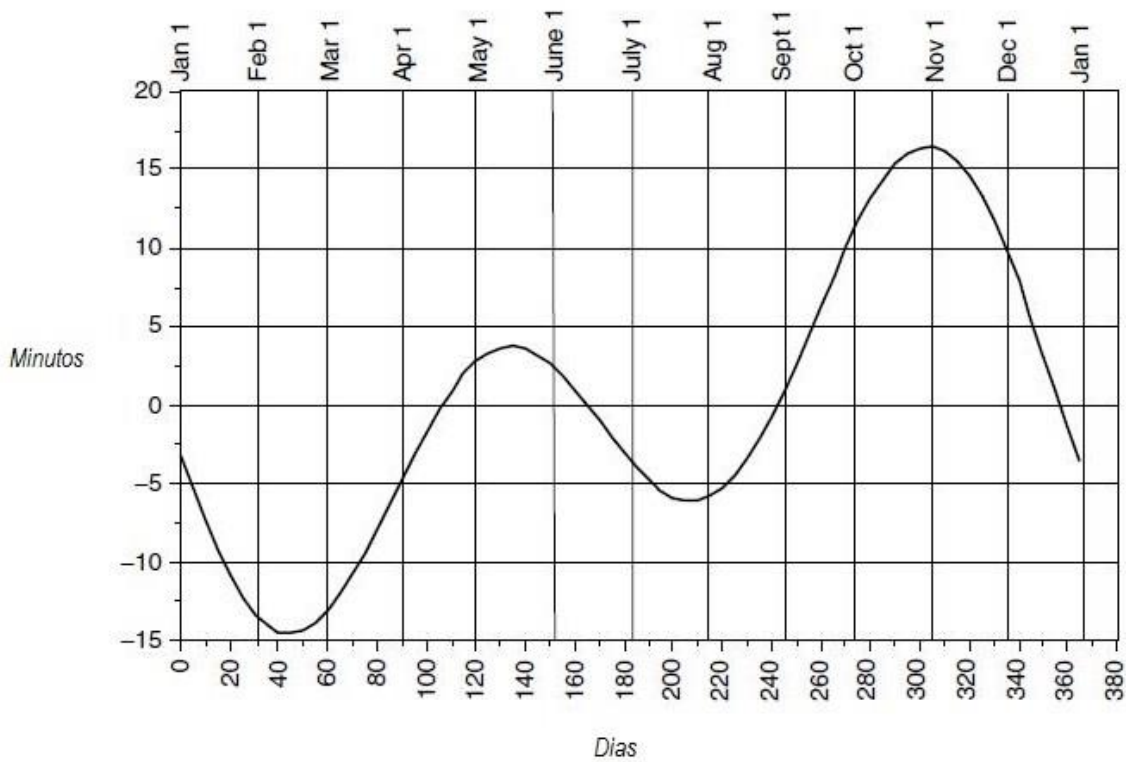


Ilustración 11 Ecuación de tiempo

### 1.4.3 Cálculo de las coordenadas horizontales

Utilizando trigonometría esférica calculamos las coordenadas horizontales a partir de las coordenadas horarias, relacionadas mediante las ecuaciones:

$$\operatorname{sen}(h_s) = \operatorname{sen} \varnothing * \operatorname{sen} \delta_s + \cos \varnothing * \cos \delta_s * \cos \omega_s \dots \dots [1.4]$$

$$\operatorname{sen}(h_s) * \cos a_s = \operatorname{sen} \varnothing * \cos \delta_s + \cos \omega_s - \cos \varnothing * \operatorname{sen} \delta_s \dots \dots [1.5]$$

$$\operatorname{sen}(h_s) * \operatorname{sen} a_s = \cos \varnothing * \operatorname{sen} \omega_s \dots \dots [1.6]$$



Donde  $\phi$  es la latitud del lugar.

A partir de estas ecuaciones se puede obtener la altura solar máxima para un día y latitud determinados. Al mediodía el ángulo horario y el ángulo acimutal del Sol son cero,  $\omega_s = 0^\circ$  y  $a_s = 0^\circ$ , correspondiendo a la altura máxima ( $h_{s,m\acute{a}x}$ ). Incorporando estos valores en la segunda de las expresiones [1.5] resulta:

$$(h_{s,m\acute{a}x}) = 90^\circ - \phi + \delta_s \quad [1.7]$$

#### 1.4.4 Diagramas de la trayectoria solar

La proyección de la trayectoria solar en la bóveda celeste sobre un plano horizontal es conocida como diagrama de la trayectoria solar. Como se ha mostrado, los ángulos ( $h_s, a_s$ ) dependen del ángulo horario, la declinación y la latitud. En un diagrama bidimensional solo se puede representar una variable frente a otra. Habitualmente se realizan representaciones en diferentes fechas del año de las trayectorias para una latitud determinada. Estos gráficos permiten una lectura directa en aquel lugar de altura y acimut en la hora y día de interés. En el caso de la Ilustración 12 cada latitud de la Tierra se caracteriza por un grupo de trayectorias solares tomadas el día 21 de cada mes, a lo largo del año.

Otro tipo de diagrama de la trayectoria solar es el rectangular. Esta carta es una proyección vertical de la trayectoria del Sol sobre la bóveda celeste (Ilustración 13).

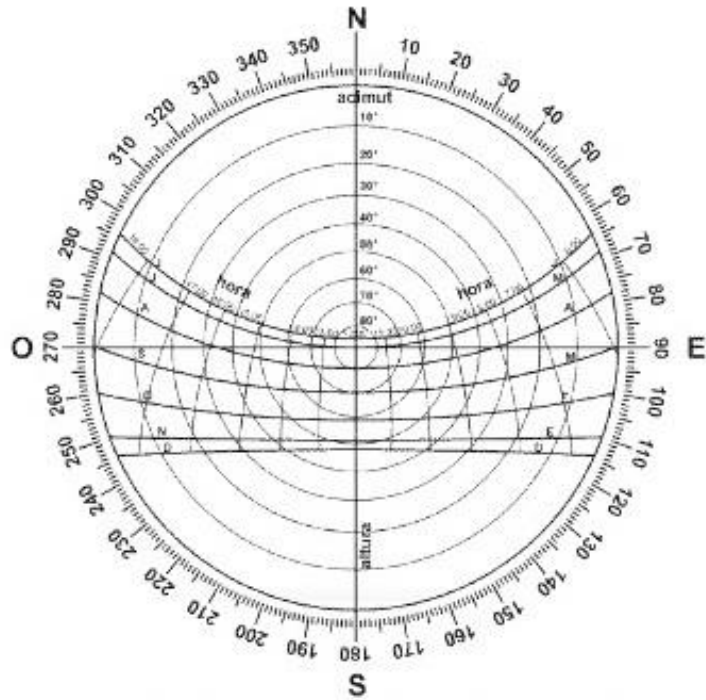


Ilustración 12 Diagrama polar de la trayectoria solar.

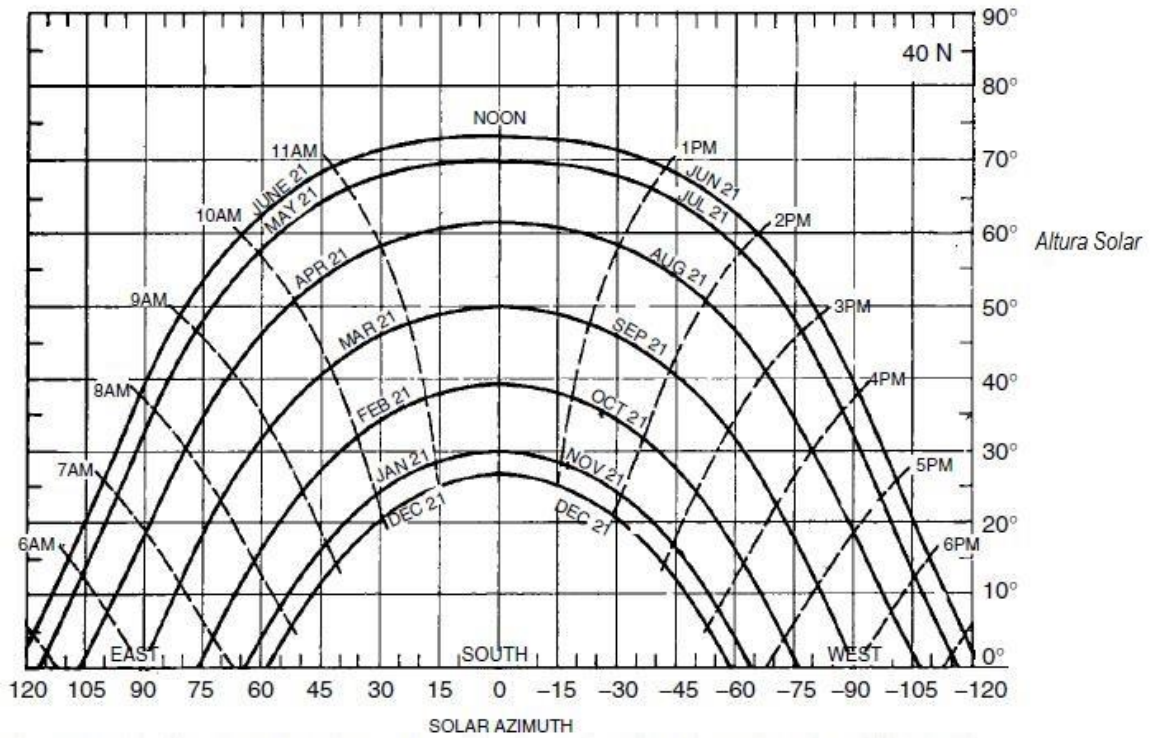


Ilustración 13 Diagrama rectangular de la trayectoria solar.

## 1.5 Irradiación extraterrestre horizontal.

La relación trigonométrica existente entre las coordenadas horarias y horizontales del Sol permite desarrollar una serie de cálculos de interés para la ingeniería solar.

### 1.5.1 Insolación máxima.

El intervalo de tiempo transcurrido entre la salida y la puesta de Sol, define el máximo tiempo de radiación solar directa posible o insolación máxima. La insolación máxima naturalmente depende de la localidad estudiada y el día del año. Imponiendo que en el instante de salida y puesta del sol la altura solar es nula,  $h_s = 0^\circ$ .

$$n_{s,máx} = \frac{2\omega_{s,p}}{15^\circ} = \frac{2 * \arccos(-\operatorname{tg} \phi * \operatorname{tg} \delta_s)}{15^\circ} \dots \dots \dots [1.6]$$

Donde  $\omega_{s,p}$  es el ángulo horario en la puesta de Sol ( $^\circ$ ) y  $n_{s,max}$  el número de horas máximas con radiación solar directa.

### 1.5.2. Irradiación extraterrestre en el plano horizontal.

Para evaluar la irradiación diaria en un plano horizontal en superficie es necesario evaluar primero la irradiación extraterrestre, entendida como la irradiancia que incide a lo largo de un día sobre un plano tangente a la superficie del planeta exterior a la atmósfera. Se ha definido la constante solar como la irradiancia que llega al plano perpendicular al Sol en el exterior de la atmósfera. Debido al movimiento del Sol el ángulo que forman los rayos con un plano tangente a la atmósfera varía diaria y anualmente. Por lo tanto la irradiancia incide sobre el plano tangente es siempre menor o igual a la constante Solar.

La relación entre la Constante Solar y la irradiancia en el exterior de la atmósfera sobre el plano horizontal ( $I_{s0}^e$ ) se expresa matemáticamente por:

$$I_{s0}^e = S_S * F_{TS} \cos(\theta) = S_S * F_{TS} \text{sen } h_s \\ = S_S * F_{TS} * (\text{sen } \phi * \text{sen } \delta_s + \cos \phi * \cos \delta_s * \cos \omega_s) \quad \dots [1.7]$$

El factor  $F_{TS}$  resulta del movimiento de la Tierra alrededor del Sol en una orbitaelíptica, esto hace que la distancia Tierra- Sol varíe a lo largo del año. La irradiancia que llega a la cima de la atmosfera depende de esta distancia. Este factor se evalúa fácilmente a partir del día del año, J:

$$F_{TS} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360 * J}{365.25}\right) \quad \dots \dots [1.8]$$

La irradiación en la cima de la atmosfera en un día determinado se obtiene integrando la expresión anterior para las 24 Horas  $H_{s0}^e$ . El resultado de esta integral es:

$$H_{s0}^e = \frac{24}{\pi} * S_S * F_{TS} * (W_{s,p} * \text{sen } \phi * \text{sen } \delta_s + \cos \phi * \cos \delta_s * \text{sen } \omega_{s,p}) \quad \dots \dots [1.9]$$

Donde  $\omega_{s,p}$  se expresa en radianes.

## 1.6 Calculo de sombras.

La pérdida de radiación solar que experimenta una superficie debida a sombras proyectadas por obstáculos circundantes varía a lo largo de un día, dependiendo de la latitud del lugar, la fecha y la hora (Ilustración 14). Las cuestiones de sombreado afectan a las aplicaciones de la energía solar en diferentes ámbitos: sombreado entre captadores de una instalación; sombreado de captadores y edificios por otros obstáculos y reducción de cargas por la intercepción de la radiación en elementos exteriores a un edificio (Ilustración 15).

La relación básica entre la longitud de la sombra ( $L_{sombra}$ ) a, la altura del obstáculo ( $H_{obst}$ ) y la altura sola ( $h_s$ ) es:

$$tg h_s = \frac{H_{obst}}{L_{sombra}} \dots \dots \dots [1.10]$$

La separación entre líneas de colectores se establece de forma que, al mediodía solar del día más desfavorable (altura solar mínima) del periodo de utilización, la sombra de la arista superior de una fila se proyecte, como máximo, sobre la arista inferior de la siguiente (Ilustración 16).

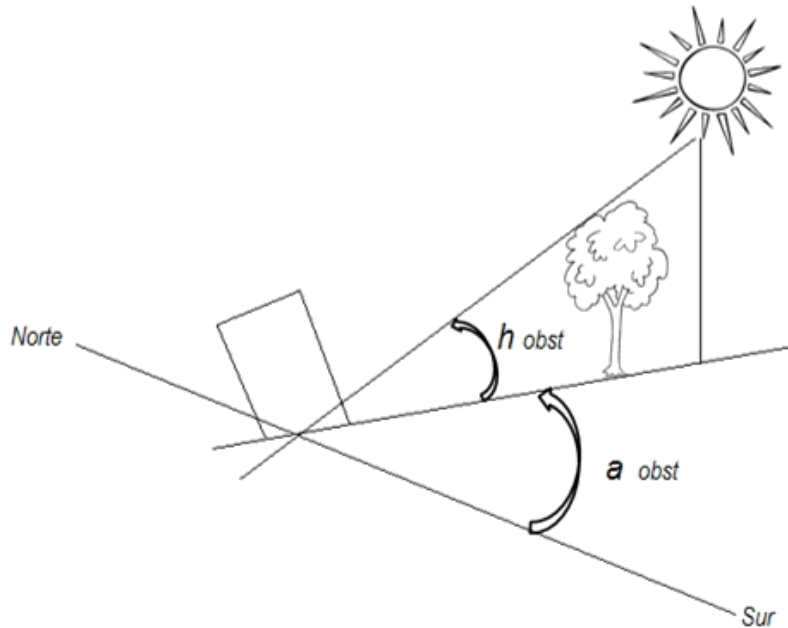


Ilustración 14 Esquema de cálculos de sombra

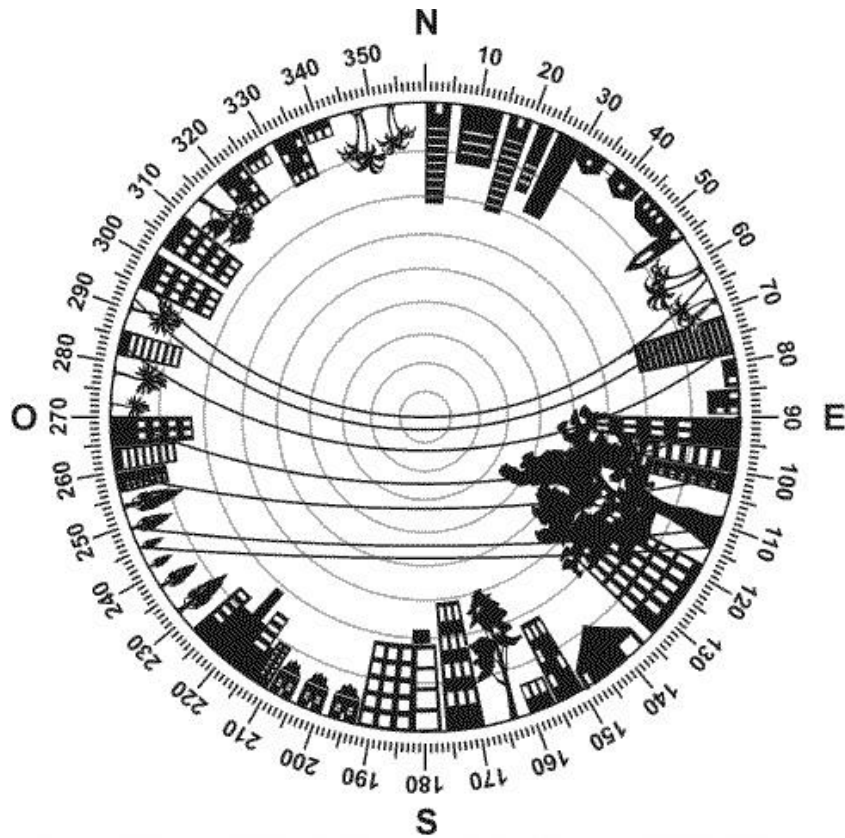


Ilustración 15 Diagrama polar de la trayectoria solar con la proyección de sombras sobre éste.

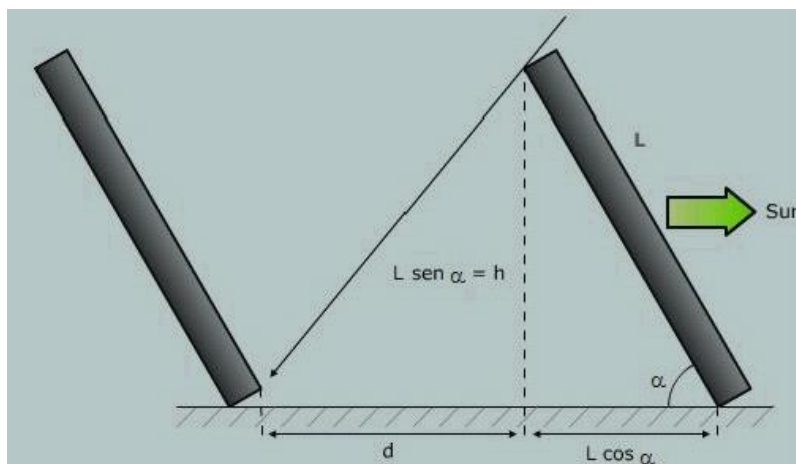


Ilustración 16 Sombreado entre colectores.

## 1.7 Irradiancia en un captador.

Las medidas de la irradiancia directa y difusa disponibles en algunas estaciones meteorológicas se realizan en el plano horizontal. El paso de estas medidas al plano

inclinado del captador requiere de modelos para la radiación difusa y la reflejada en los alrededores del captador.

### 1.7.1 Angulo de incidencia.

La orientación del plano de un captador se determina a partir de las coordenadas del vector director, perpendicular a él. Este vector queda definido por el ángulo cenital que coincide con la inclinación del plano ( $\beta_c$ ) respecto a la horizontal y el ángulo acimutal ( $a_c$ ) (Ilustración 17). Se define al ángulo de incidencia como el ángulo que forma la radiación solar directa con el vector director del plano.

De forma análoga a lo estudiado para las superficies horizontales, la irradiancia recibida sobre un plano inclinado, y por extensión en un captador, depende del ángulo de incidencia ( $i$ ) de los rayos solares sobre este.

El ángulo de incidencia sobre un plano depende de las coordenadas horarias del Sol ( $\delta_s, \omega_s$ ), según la expresión trigonométrica:

$$\cos(i) = \text{sen}(h_s) * \cos \beta_c + \text{sen}(h_s) * \text{sen} \beta_c * \cos(a_s - a_c) \dots \dots \dots [1.11]$$

Se observa que para el caso particular de superficie horizontal,  $\beta_s = 0^\circ$ , el ángulo de incidencia coincide con el ángulo cenital solar y la expresión anterior ha sido ya empleada en la ecuación [1.8].

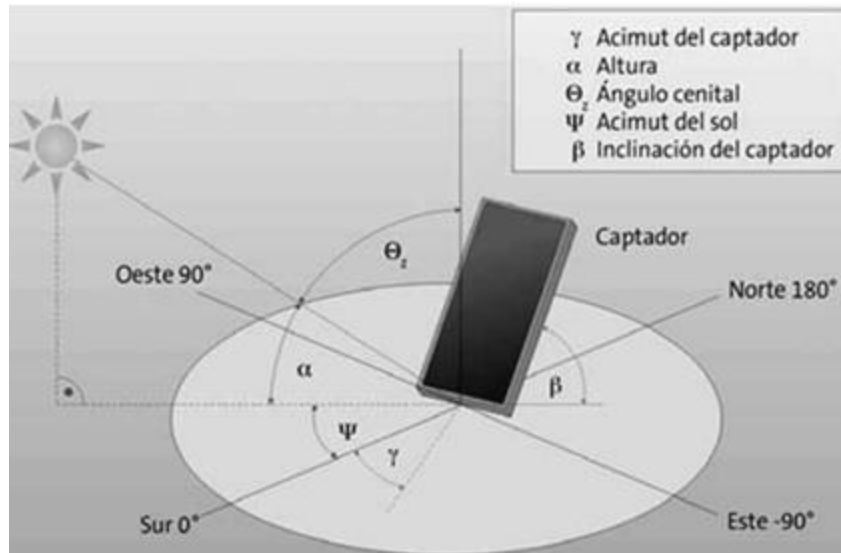


Ilustración 17 Definición del ángulo de incidencia sobre un plano inclinado y orientado

### 1.7.2 Irradiancia en el plano inclinado

La irradiancia recibida por un captador inclinado en superficie es la combinación de la irradiancia directa ( $I_{sb}$ ), la difusa ( $I_{sd}$ ) y la reflejada en las superficies frente al captador ( $I_{s,re}$ ):

$$I_s = I_{sb} + I_{s,d} + I_{s,re} \dots \dots [1.12]$$

La irradiancia en el plano del captador se evalúa a partir de las medidas de la radiación directa y difusa en la horizontal. La primera componente, la radiación directa en el plano del captador se determina a partir de las medidas de la radiación directa en la horizontal:

$$I_{sb} = I_{s0b} \cos(i) \dots \dots \dots [1.13]$$



La distribución de la radiación difusa en la bóveda celeste depende de la nubosidad y claridad atmosféricas, altamente variables. Incluso en días despejados la irradiancia difusa que alcanza la superficie es claramente anisótropa. En una sencilla descripción cualitativa la radiación difusa comprende: una componente isótropa, uniforme en todas las direcciones de la bóveda celeste; una componente circumsolar, resultante de la dispersión atmosférica y concentrada en la zona de la bóveda alrededor del Sol, y el brillo del horizonte, especialmente pronunciado en cielos muy despejados.

La evaluación de la radiación difusa para aplicaciones en ingeniería o arquitectura es complicada. La norma CIE DS 011.2/E:2002 detalla su cálculo bajo un amplio rango de condiciones, desde cielos completamente cubiertos a cielos despejados. Un ejemplo de modelo matemático para la evaluación de la componente difusa sobre un plano inclinado a partir de medidas de irradiancia directa y difusa en la horizontal es el propuesto por Pérez et al.(1990):

$$I_{s,d} = I_{s0,d} \left[ 0.5 (1 - F_1)(1 + \cos \beta_c) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \operatorname{sen} \beta_c \right] \dots \dots [1.13]$$

Donde  $I_{s0,d}$  es la irradiancia en el plano horizontal ( $Wm^{-2}$ ),  $F_1$  el factor de anisotropía circumsolar y  $F_2$  el factor de anisotropía del horizonte, ambos tabulados para diferentes condiciones atmosféricas. Los factores a y b se definen según:

$$a = \operatorname{máx} \{0; \cos(i)\}$$

$$b = \operatorname{máx} \{0.087; \operatorname{sen} (h_s)\}$$

La radiación reflejada en el suelo recibida por el captador es función de la radiación global incidente en el plano horizontal:

$$I_{re} = 0.5 * p' * I_{s0} (1 - \cos \beta_c) \dots \dots \dots [1.14]$$

## 1.8 Irradiación en un captador

En las localidades en las que son disponibles datos medidos de irradiación, se refieren a la magnitud global sobre el plano horizontal ( $H_{s0}$ ). En muy pocas estaciones se mide por separado la componente directa y difusa incidentes sobre la superficie. Por lo tanto hay que considerar que los datos de partida generalmente serán irradiaciones globales. Además, para poder diseñar instalaciones de captación solar es necesario convertir los datos medidos en el plano horizontal a datos de irradiación en el plano inclinado, considerando las diversas componentes de la radiación.

### 1.8.1. Irradiación mensual en planos inclinados.

Liu y Jordan (1962) desarrollaron un método para resolver la cuestión aproximando a partir de la irradiación global horizontal las componentes directa, difusa y reflejada. El algoritmo de Liu y Jordan (1962), que considera modelo de cielo isotrópico, era aplicable únicamente a captadores orientados al Sur. Klein (1977) extendió este trabajo a cualquier orientación. La irradiancia diaria sobre el plano inclinado se expresa como:

$$H_s = R_A * H_{s0} \dots \dots [1.15]$$

Siendo  $R_A$  el cociente entre la media mensual de irradiación global diaria sobre el plano inclinado y sobre el horizontal.

### 1.8.2 Orientación e inclinación óptima de los captadores.

Los captadores han de situarse de tal forma que a lo largo del periodo anual de utilización aprovechen al máximo la radiación solar disponible. Salvo problemas excepcionales con las sombras de captadores se orientan hacia el sur geográfico en el hemisferio norte. Desviaciones de hasta  $20^\circ$  hacia el SE o SO con respecto a la orientación no afectan sensiblemente al rendimiento del sistema.

La determinación de la inclinación óptima de los captadores solares es fundamental en los sistemas solares. Los cálculos permiten afirmar que para obtener la captación máxima anual en una localidad determinada es conveniente situar los módulos o colectores con una inclinación igual a la latitud del lugar. Si el aprovechamiento máximo es necesario en verano, la inclinación debe disminuirse unos  $15^\circ$  y si, por el contrario, se requiere un diseño adecuado para el invierno, debe aumentarse en la misma cantidad.

## CAPÍTULO 2

### 2. CELDAS Y MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

#### 2.1 Introducción a las celdas fotovoltaicas

Las primeras observaciones de fenómenos que relacionan luz y electricidad datan de principio del siglo XIX. A lo largo de ese mismo siglo se describieron diferentes relaciones entre la luz y la electricidad: el efecto fotoemisor, consistente en la emisión de cargas por un metal iluminado, el efecto fotoconductor, que describe la variación en la conductividad eléctrica de un metal al ser iluminado y el efecto fotovoltaico, en el cual se genera una fuerza electromotriz en el metal, descrito por Becquerel en 1839. Los trabajos en efecto fotovoltaico llevaron a Chapin, Fuller y Pearson a desarrollar, en 1954, en los laboratorios Bell, la primera celda solar capaz de convertir la radiación solar en energía eléctrica. También en ese mismo año se comenzaron a fabricar con éxito las primeras celdas solares de capa delgada, mediante la realización de contactos de diversos metales con SCd.

La materia base de las celdas son materiales semiconductores también utilizados en otros dispositivos como diodos, transistores y circuitos integrados. Actualmente existe una amplia gama de celdas que utilizan diferentes materiales y estructuras, el objetivo perseguido es obtener la máxima eficiencia al mínimo coste. En esta carrera se han conseguido importantes avances. Así, por ejemplo, se han ensayado en laboratorios celdas con eficiencias próximas al 30% mientras que las fabricadas industrialmente superan, con frecuencia, el 15%.

Las celdas de silicio cristalino, algunas con hasta de 20 años de garantía y una eficiencia del 18%, comparten el mercado con las celdas policristalinas (Ilustración 18). Más económicas pero también considerablemente menos eficientes son las celdas de capa delgada de silicio amorfo, aplicadas en un principio a relojes, calculadoras e ingenios de baja potencia pero también disponibles en módulos para instalaciones de mayor entidad. Se están empezando a fabricar celdas de capa delgada de diferentes compuestos semiconductores como el telurio de cadmio y el diseleniuro indio que prometen eficiencias aceptables combinadas con precios más bajos.

También se están trabajando en celdas de alta eficiencia de silicio monocristalino, arseniuro de galio y fosforo de indio para aplicaciones especializadas como la generación de potencia en los satélites o en sistemas que utilizan luz concentrada.

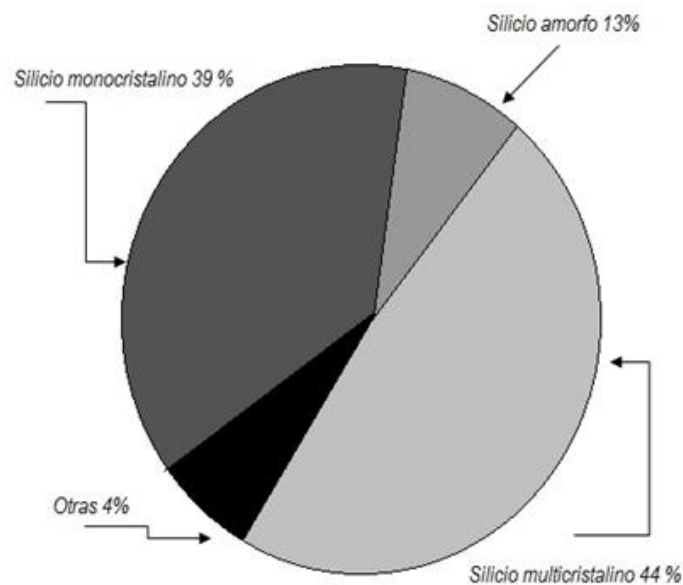


Ilustración 18 Mercado de las celdas fotovoltaicas.

## 2.2 Fundamentos de las celdas solares

### 2.2.1 Absorción de la luz y efecto fotovoltaico

Una celda fotovoltaica convencional de silicio se fabrica a partir de una barra cristalina de silicio dopado con boro, cortado en discos de un espesor de 0.3 mm. Una de sus caras se coloca en una atmosfera gaseosa, a alta temperatura, rica en fosforo con lo que, mediante procesos de difusión, se consigue una elevada concentración de fosforo en dicho extremo (en un espesor entre 0.3 y 1 mm, aproximadamente), superior a la concentración inicial de boro. Con ello, se constituye una unión p-n, fundamento de la celda solar fotovoltaica. Seguidamente, se deposita una rejilla conductora metálica sobre esta cara, y una capa metálica conductora sobre la cara opuesta, a fin de que actúen los electrodos colectores de las cargas eléctricas generadas y para establecer las conexiones eléctricas entre las celdas (Ilustración 19).

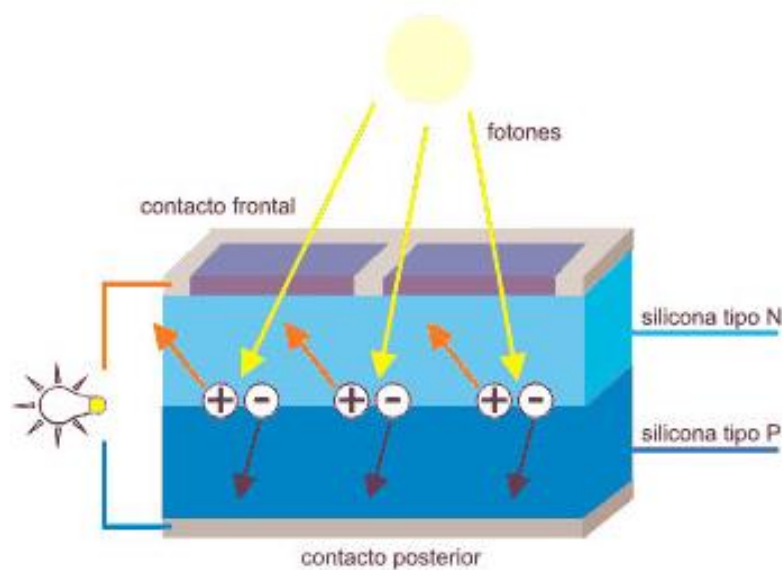


Ilustración 19 Efecto Fotoeléctrico

Cuando un flujo de fotones incide sobre la celda construida a partir de la unión entre semiconductores tipo p y tipo n, parte de ellos son absorbidos en el material. Los fotones que poseen una energía mayor al salto energético entre la banda de conducción y la de valencia pueden ser absorbidos y forzar el salto de un electrón entre estas dos bandas. Como este salto deja un hueco en la banda de valencia, se dice que la absorción de un fotón genera un par electrón – hueco. Si esta generación tiene lugar a una distancia de la unión inferior a la denominada longitud de difusión existe una alta probabilidad de que estos portadores de carga eléctrica (el electrón y el hueco) sean separados por el elevado campo eléctrico existente en la unión p-n, produciéndose la separación de ambas cargas: el electrón se desplaza hacia la zona n y el hueco hacia la zona p, creándose, con ello, una corriente de electrones desde la zona n a la zona p. Si se conectan ambas regiones mediante un circuito eléctrico exterior, se establece una corriente eléctrica a través de este. En esto consiste, precisamente, el efecto fotovoltaico: es la conversión directa, según el mecanismo que se acaba de explicar, de radiación electromagnética en corriente eléctrica, mediante un dispositivo llamado celda fotovoltaica.

El salto energético entre bandas limita la proporción de radiación que puede ser absorbida en un semiconductor. Una celda de silicio puede aprovechar alrededor de un 65% de radiación solar recibida. En el caso de celdas construidas a partir de otros semiconductores, con distinta anchura energética de banda prohibida, la energía mínima de los fotones de la luz incidente para producir pares electrón – hueco es distinta, así como la fracción de la energía incidente que puede aprovecharse.

El efecto fotovoltaico se produce de forma prácticamente instantánea, de forma que las celdas fotovoltaicas generan electricidad inmediatamente después de ser iluminadas.

### 2.3 Características eléctricas de las celdas fotovoltaicas.

En la celda solar típica la corriente generada en el semiconductor es extraída por los contactos en las caras anterior y posterior, según se muestra la figura 2.2. La estructura del contacto en la cara frontal está hecha con unos dedos metálicos delgados, ampliamente espaciados, para permitir el paso de la radiación solar entre ellos. La celda es cubierta con una fina capa de metal dieléctrico antirreflectante para minimizar pérdidas por reflexión en la cara superior.

Si conectamos la cara anterior y posterior de una celda fotovoltaica iluminada a un circuito exterior conseguiremos hacer circular por este una intensidad  $I(A)$ . La curva I-V de una celda solar se puede obtener a partir del circuito equivalente del dispositivo. La estructura de una celda solar fotovoltaica es la misma que la de uno de los dispositivos electrónicos de estado sólido más utilizados, a saber, el diodo. En ausencia de iluminación, la intensidad eléctrica que circula a través de una celda,  $I$ , coincide con la de un diodo,  $I_D$ , y es debida a la combinación inducida dentro del dispositivo por efecto de la tensión  $V$ , viniendo expresada, en función de la tensión,  $V$ , y de la temperatura,  $T(K)$ , según la ecuación:

$$I = I_D = I_0(T) \left[ \exp\left(\frac{qE}{K_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots 2.1$$

Siendo  $K_B$  la constante de Boltzmann.

El parámetro  $I_0(T)$ , denominado corriente inversa de saturación de diodo (A), depende fuertemente de la temperatura,  $T$ , según la expresión:

$$I_0(T) \propto \left[ \frac{-E_g}{K_B T} \right] \dots \dots 2.2$$



En presencia de iluminación, la generación de corriente  $I_L$  por la luz se presenta por la corriente de un generador en paralelo con el diodo (que representa la unión p-n). La corriente de salida  $I$  es igual a la diferencia entre la corriente fotogenerada  $I_L$  y la corriente de diodo  $I_D$ :

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q_E V}{K_B T}\right) - 1 \right] \dots \dots \dots [2.3]$$

En circuito abierto, cuando  $I=0$ , toda la luz generada pasa a través del diodo. En cortocircuito,  $V=0$ , toda corriente pasa a través de las cargas externas.

La curva ideal de una celda se ve alterada por la presencia de tres factores: el factor de idealidad, la resistencia serie y la resistencia paralelo. El factor de idealidad,  $n_I$ , es un factor de corrección cuyo valor suele estar comprendido entre 1 y 2. En el caso de una celda solar ideal se toma  $n_I = 1$ . En cambio, en celdas solares reales, con una importante influencia de los procesos de recombinación, el factor de idealidad se acerca más a 2. La resistencia serie,  $R_S$ , es una resistencia interna de la celda y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio material semiconductor. La resistencia paralelo,  $R_P$ , tiene su origen en imperfecciones en la calidad de la unión p-n y es responsable de la existencia de fugas de corriente. La existencia de las resistencias serie y paralelo afectan significativamente al denominado factor de forma, FF, explicado más adelante, y, a través de este, a la eficiencia de la celda. Estos dos factores se consideran en el modelo de la celda, de forma que, finalmente, su ecuación característica será:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{q_E (V + R_S I)}{n_1 K_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \dots \dots \dots [2.4]$$

Cuya representación gráfica da lugar a la curva característica de una celda solar, el circuito equivalente de una celda solar fotovoltaica se ilustra en la (Ilustración 20).

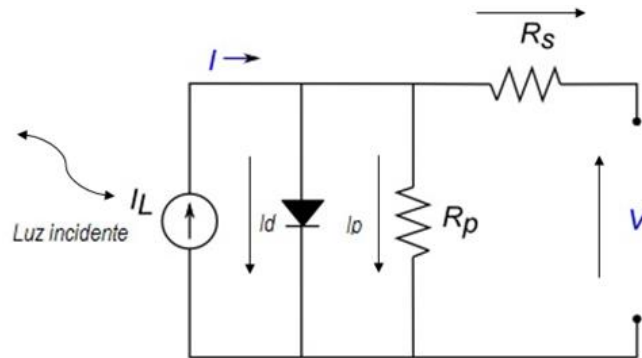


Ilustración 20 Circuito Equivalente de una Celda Solar

### 2.3.1 Parámetros de funcionamiento.

Los parámetros eléctricos que definen el funcionamiento de la celda solar, destacados en la Ilustración 21 son :

Intensidad de cortocircuito,  $I_{SC,cel}$ : Es la intensidad de la corriente eléctrica que se obtiene de la celda cuando, en ausencia de cargas externas y tras haber sido cortocircuitada en sus terminales, la tensión entre bornes es nula. Constituye la máxima corriente que puede obtenerse. Su valor típico es de decenas de miliamperios por centímetro cuadrado de la celda.

Tensión en circuito abierto,  $V_{OC,cel}$ : Es la tensión para la que los procesos de recombinación igualan a los de generación y por lo tanto, la corriente extraída de la celda es nula. Constituyen la máxima tensión que puede obtenerse de la celda, cuando no hay conectado ningún consumo y la intensidad que circula es nula. En dispositivos de silicio de tipo medio se sitúan en torno a 0.6 V mientras que en las de GaAs, alrededor de 1V.

Potencia máxima o Potencia Pico,  $P_{cel}$ : La potencia que se extrae de la celda viene dada por el producto de corriente y tensión,  $I \cdot V$  y se representa en la Ilustración 21 mediante

una línea de trazos y puntos. Se observa que tanto en corto circuito como en circuito abierto la potencia generada es nula. Existe un punto de operación  $(I_{P,cel}, V_{P,cel})$  en el cual la potencia disipada en la carga es máxima, denominado punto de máxima potencia. En resumen, la potencia máxima o pico,  $P_{cel}$ , es la potencia máxima que puede generar una celda fotovoltaica bajo unas condiciones estándar de la radiación incidente, y se obtiene como el producto de la tensión pico y de la intensidad pico:

$$P_{cel} = I_{P,cel} * V_{P,cel} \dots\dots\dots[2.5]$$

Siendo la intensidad pico,  $I_{P,cel}$ , y la tensión pico,  $V_{P,cel}$ , los valores de la intensidad y la tensión para los cuales la potencia suministrada por la celda alcanzada el valor máximo posible, en unas condiciones normalizadas.

Las definiciones de estos parámetros característicos de las celdas son también válidas para caracterizar los módulos o paneles fotovoltaicos, constituidos a partir de un conjunto de celdas solares.

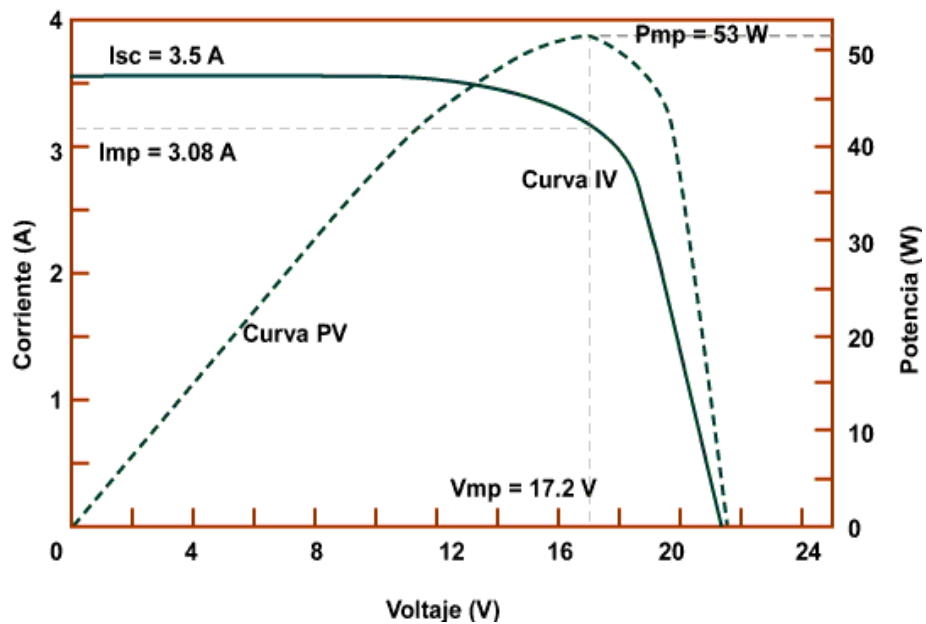


Ilustración 21 Curva característica I-V de una Celda Solar

## 2.4 Efectos de la irradiancia y temperatura

En la práctica las celdas solares no operan bajo condiciones de certificación estándar. Los parámetros de mayor influencia sobre la curva I-V de una celda fotovoltaica serán la irradiancia y la temperatura. Por un lado, dado que la corriente de cargas generadas a partir de la radiación luminosa es proporcional al flujo de fotones con energía superior a la anchura de la banda prohibida (gap), la intensidad de cortocircuito de una celda solar es directamente proporcional a la intensidad de la iluminación incidente: ante un determinado aumento o disminución porcentual de la iluminación, la intensidad se ve modificada con un cambio porcentual similar en el mismo sentido, según pone de manifiesto las Ilustraciones 22 y 23. En cambio, la tensión en circuito abierto no experimenta grandes variaciones al modificarse las condiciones de la radiación solar. En consecuencia, la potencia generada es prácticamente proporcional a la irradiancia (Ilustración 24). Estos hechos tienen consecuencias interesantes. Por una parte. La proporcionalidad con la irradiancia permite el cálculo de la producción diaria fácilmente. Por otra parte la estabilidad de las tensiones facilita el diseño de módulos para conseguir tensiones determinadas aunque las irradiancias sean pequeñas. Con todo, a irradiancias inferiores a  $200 \text{ Wm}^{-2}$  la producción de las celdas de silicio monocristalino es prácticamente despreciable.

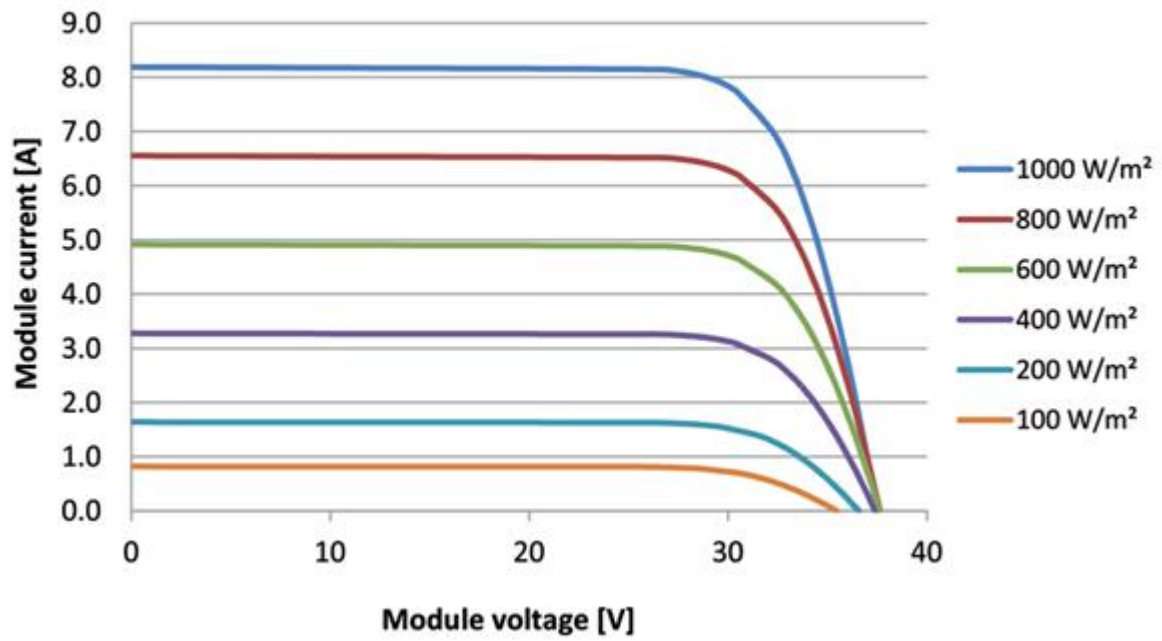


Ilustración 22 Dependencia de las curvas I-V de una celda fotovoltaica con la irradiancia solar

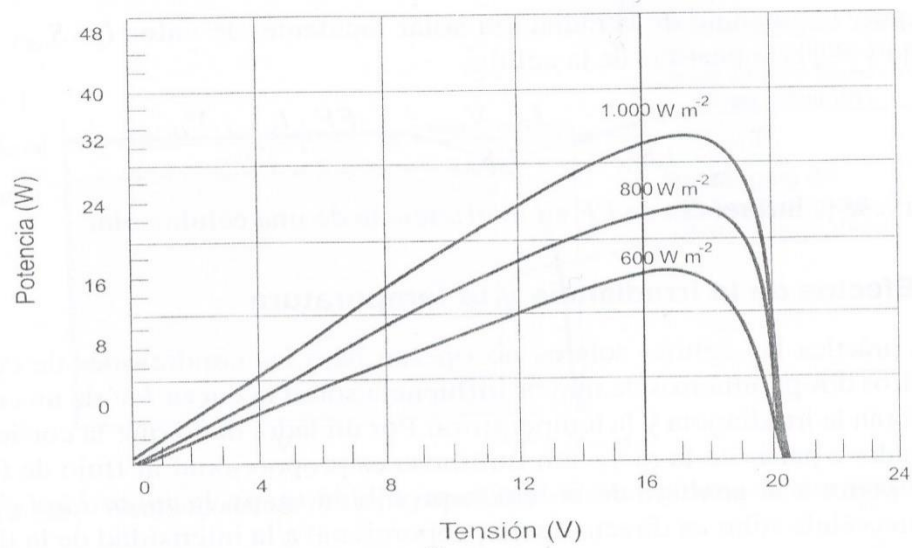
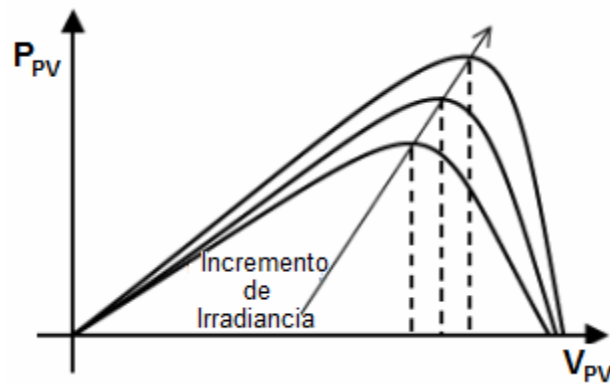


Ilustración 23 Variación de la curva característica potencia-tensión de una celda solar fotovoltaica



*Ilustración 24 Potencia generada proporcional a la irradiancia.*

El efecto de la temperatura sobre la curva I-V es significativamente diferente, según muestra la Ilustración 25. Así, al aumentar la temperatura la tensión del circuito abierto disminuye del orden de unos pocos milivoltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura ( $2.3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  para el Si y entre  $2$  y  $2.2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  en el caso de GaAs). Además, como consecuencia de esta variación de  $V_{OC}$ , el factor de forma FF también disminuye a medida que aumenta la temperatura, lo que provoca, a su vez, que la eficiencia de la celda haga lo propio: disminuir al aumentar la temperatura (se reduce entre el  $0.4$  y  $0.5\%$  por  $^{\circ}\text{C}$  en las celdas de Si y alrededor de  $0.3\%$  por  $^{\circ}\text{C}$  en las de GaAs). La intensidad de corriente de cortocircuito, en cambio, permanece prácticamente constante (en realidad, aumenta ligeramente al hacerlo la temperatura). La Ilustración 26 muestra las variaciones de las principales características eléctricas de una celda solar en función de la temperatura.

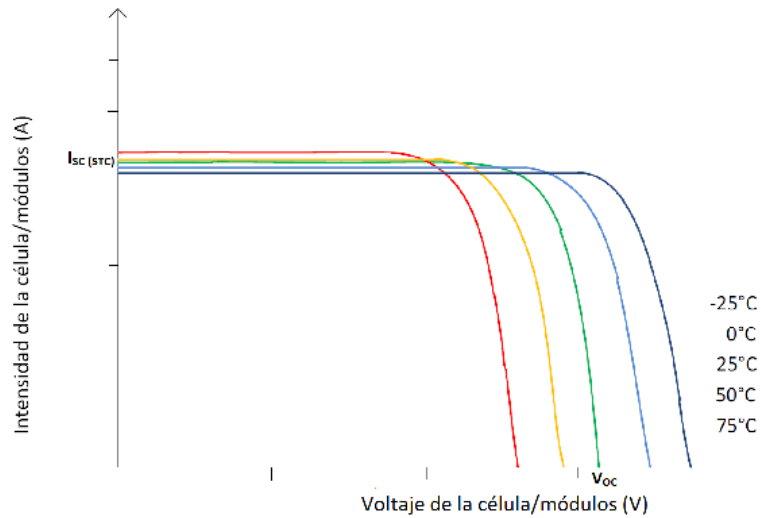


Ilustración 25 Efecto de la temperatura sobre la curva I-V.

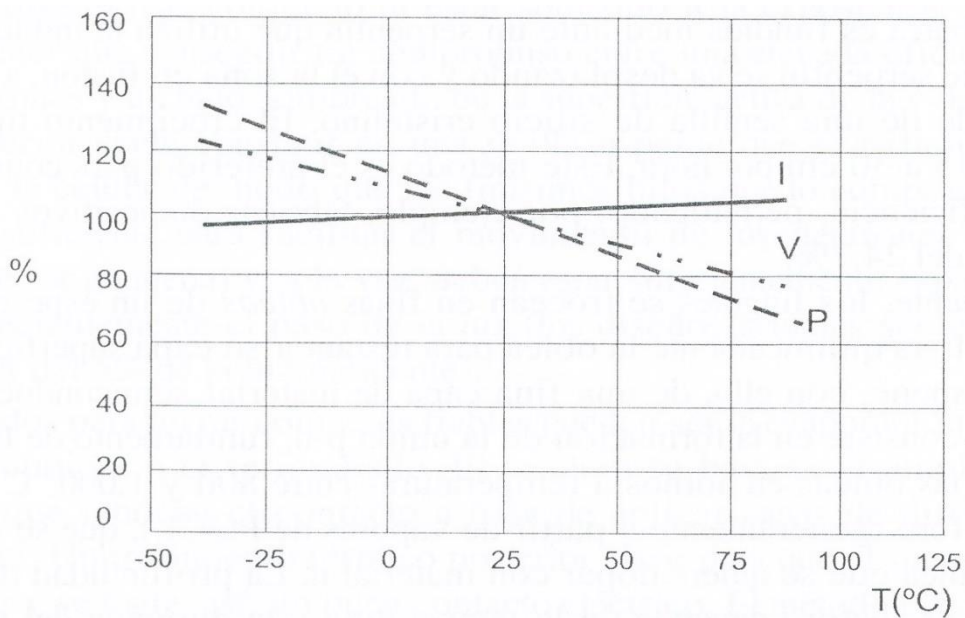


Ilustración 26 Variación de las principales magnitudes eléctricas de una celda solar fotovoltaica en función de la temperatura.

## 2.5 Funcionamiento de los módulos fotovoltaicos.

La mayoría de fabricantes especifican las características de sus módulos fotovoltaicos en las siguientes condiciones de prueba estándar:

Irradiancia:  $1000 \text{ Wm}^{-2}$

Incidencia de la luz: perpendicular al modulo

Distribución espectral: AM1.5

Temperatura de la celda: 25°C

La generación del módulo en estas condiciones es llamada potencia pico y se expresa en watts pico,  $W_p$ . Las tres características más importantes del módulo, que derivan de la curva I-V de las celdas que lo componen, son la tensión en circuito abierto, la intensidad de cortocircuito y la potencia máxima.

Los paneles solares usados en este trabajo son de 10 Watts, de 54 celdas se muestran en las Ilustraciones 27 y 28.



*Ilustración 27 Panel solar de silicio*



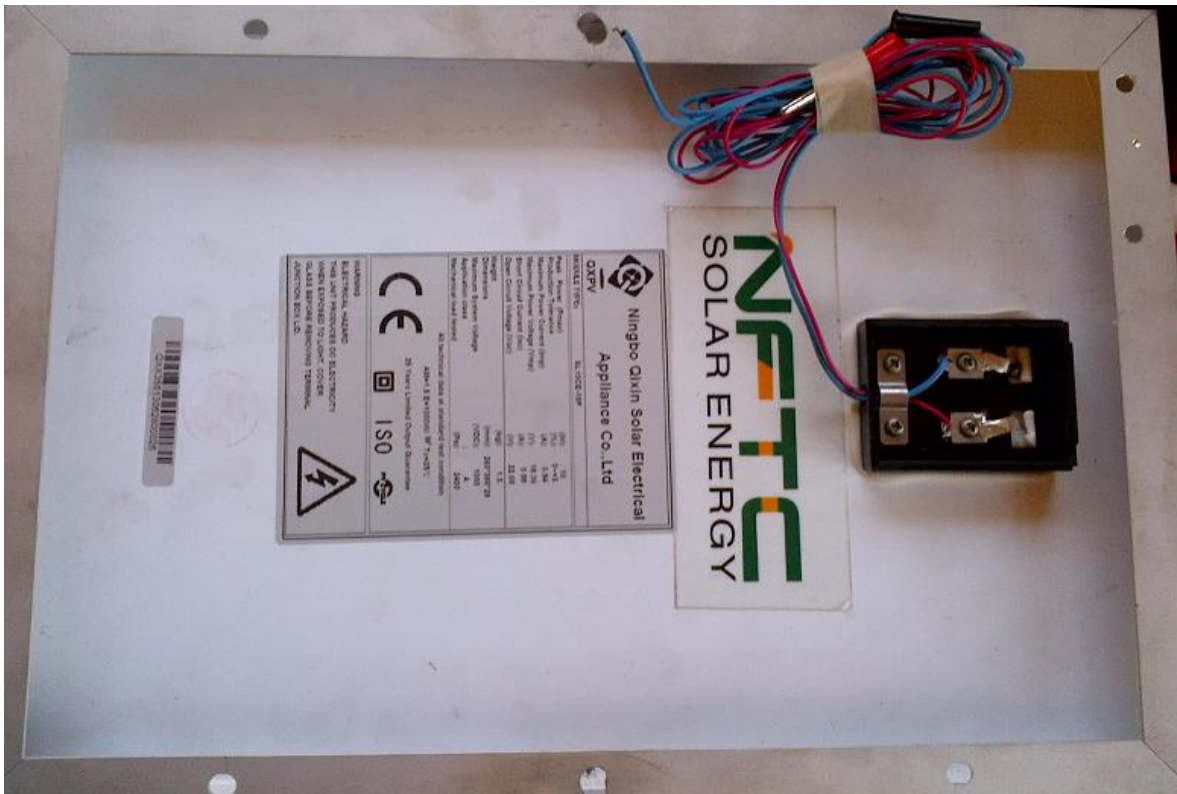


Ilustración 28 Datos técnicos panel solar

Tabla 3 Tabla datos técnicos

Potencia pico máxima	10 Watts
Corriente a máxima potencia	0.54 Amperes
Voltaje a máxima potencia	18.36 Volts
Corriente de corto circuito	0.58 Amperes
Voltaje de circuito abierto	22.00 Volts

## CAPÍTULO 3

### 3. Diseño Mecánico

#### 3.1 Introducción

El diseño se realizó en aluminio, por ser un material relativamente liviano, resistente a la oxidación y facilitar la fabricación del prototipo. Como se mencionó debemos movernos en dos ejes, un horizontal que será el que mida el ángulo acimutal y otro vertical que nos proporcione la altura solar del seguidor.

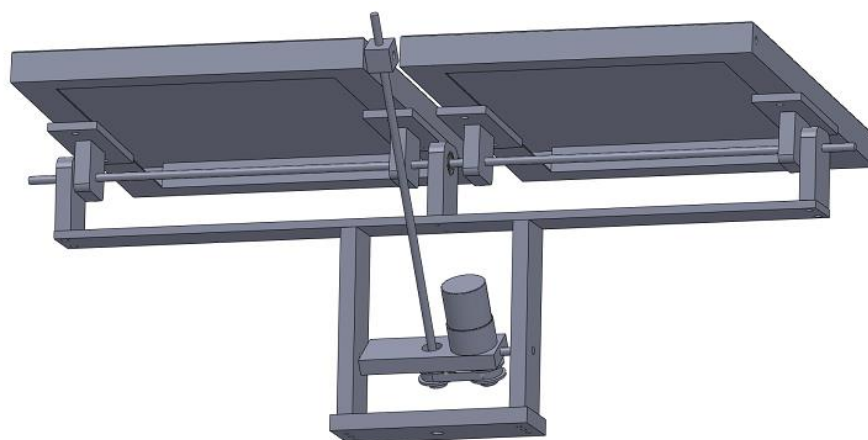
La propuesta es la siguiente, en una etapa inicial, debido a que se debe tener un torque de motor mínimo, para mantener las celdas en una posición determinada se optó por diseñarlo con un tornillo de potencia con juego cero conocido como "cuerda Acme", como se muestra en la Ilustración 29. El motor está acoplado a una polea dentada, que a su vez gira el tornillo, mismo que mueve las celdas para que las mismas queden de manera perpendicular a los rayos solares una vez posicionados el motor se apaga manteniendo la posición sin consumo de energía. Ilustración 30. La ilustración 31 muestra el diseño del eje que controla la altura solar.



*Ilustración 29 Cuerda "Acme", y tuerca con juego cero*

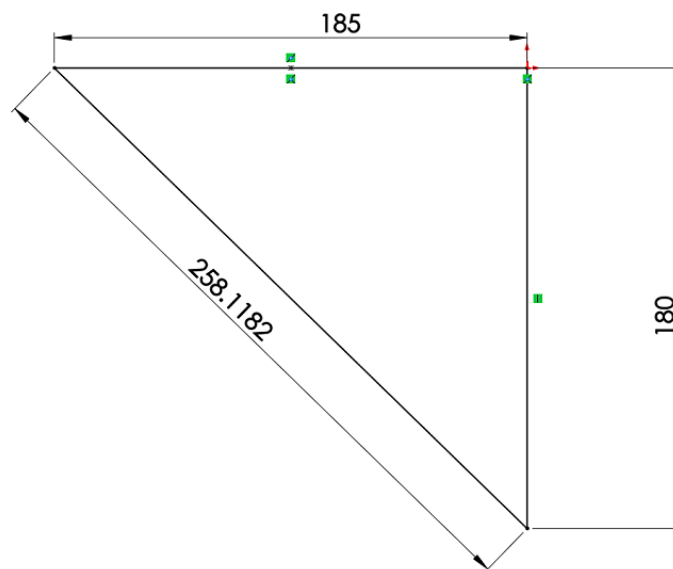


*Ilustración 30 Detalle de la transmisión del motor y el tornillo Acme*



*Ilustración 31 Movimiento del eje que controla la altura solar*

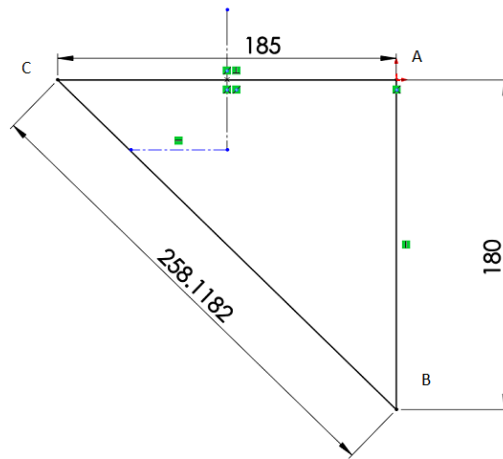
El ángulo al que se puede mover es de  $10^\circ$  a  $90^\circ$ , suficiente para alcanzar la coordenada de la altura solar. Se utilizan dos celdas de iguales características, para medir de manera simultánea el voltaje y la corriente. El sistema queda de la siguiente manera, y como las poleas son iguales podemos determinar el ángulo, al que se posiciona a través del encoder incremental de la siguiente manera, si consideramos que el paso del tornillo de potencia es de 2mm por revolución y no tiene juego, debido a la tuerca. También si consideramos que el encoder del servomotor es de 64 ppr (64 pulsos x revolución) y tiene una caja de engranes con un relación de 70:1, por lo que realizando los cálculos, y tomando en cuenta las dimensiones establecidas en el diseño la Ilustración 32 nos muestra los detalle de las dimensiones.



*Ilustración 32 Dimensiones del modelo*

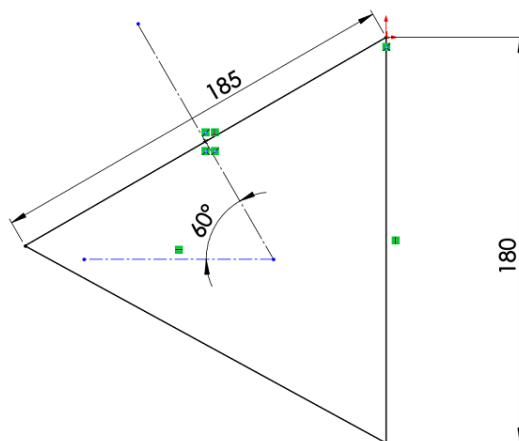
La parte superior es la mitad del panel solar, es el cateto superior del triángulo, no cambia de dimensión, el otro cateto es la distancia que existe de la parte superior del panel solar, hasta la posición del motor, tampoco cambian esa distancia, la hipotenusa del triángulo es el tornillo de potencia y es la distancia que se modifica con el movimiento del motor transmitido a la polea. Si consideramos que el panel está totalmente horizontal

entonces será la posición mostrada. Por cada revoluciones del motor (64x20 pulsos), el tornillo girara una vuelta y la hipotenusa se reducirá dos milímetros.



*Ilustración 33 Cálculo de los ángulos*

Si consideramos la recta CA, como la mitad de la celda entonces, para un ángulo de 90 grados (posición mostrada en la Ilustración 33), el tornillo de potencia tendrá una longitud 258.1182 mm, que es el máximo alcance y suficiente para alcanzar la "altura solar". Consideremos una "altura solar" de 60°, como se muestra en la Ilustración 34 como vemos este ángulo es como si levantáramos la cara viendo hacia el sol representado por la línea punteada.

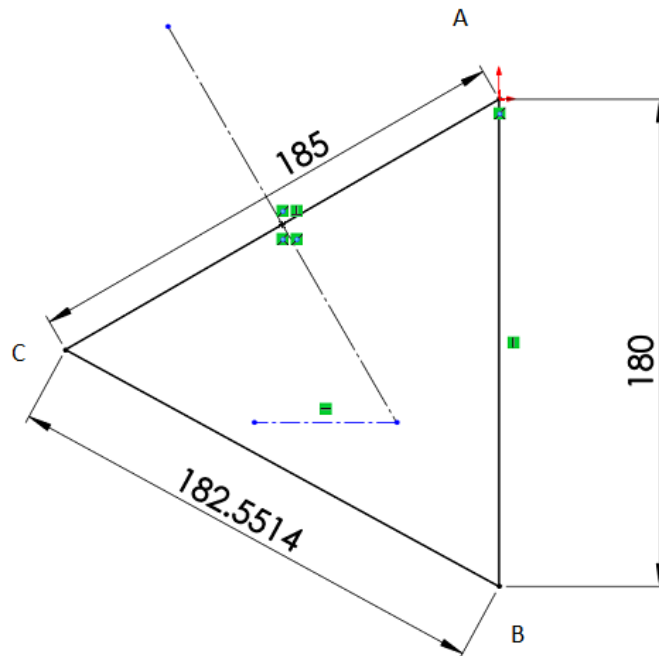


*Ilustración 34 Altura solar de 60°*

Calculamos esta longitud del tornillo de potencia, con la ley de cosenos y notando que el ángulo de  $60^\circ$  es exactamente el mismo que se forma entre el panel solar y el cateto vertical es decir el localizado en el vértice A

$$BC = \sqrt{185^2 + 180^2 - 2(185)(180) \cos 60^\circ} = 182.55 \text{ mm}$$

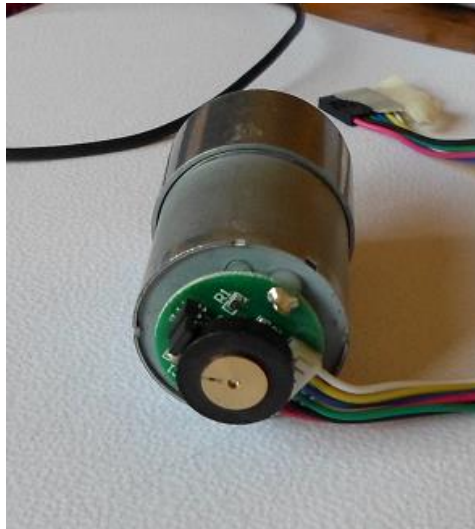
Si le restamos la distancia original cuando el ángulo medio  $90^\circ$ , tendremos un desplazamiento de  $75.5682 \text{ mm}$  de la posición de  $60^\circ$  a  $90^\circ$  como lo muestra la Ilustración 35.



*Ilustración 35 Cálculo de la distancia del tornillo*

Como el recorrido es de  $75.5682 \text{ mm}$  el tornillo tiene un paso de  $2 \text{ mm/rev}$ . deberá girar  $[75.5682 \text{ mm}] \left[ \frac{\text{rev}}{2 \text{ mm}} \right] = 37.7841 \text{ rev}$  para alcanzar la posición de  $60^\circ$  desde los  $90^\circ$ . El eje esta acoplado a un servomotor a través de dos poleas del mismo diámetro, con una

caja de engranes de relación 70:1, por lo que el motor deberá girar  $70 \times 37.7841 = 2644.887$  rev, para alcanzar dicha posición. El encoder proporciona 64 pulsos por revolución, es decir el software deberá contar  $2644.887 \times 64$  pulsos para alcanzar dicha posición. Ilustración 36 Los detalles de la programación se ven en el siguiente capítulo.



*Ilustración 36 Encoder del motor*

El otro eje, nos proporciona el ángulo acimutal que es medido a partir de la línea norte-sur, girando hacia la derecha, quedando de frente al sol. Esta unido por medio de dos poleas dentadas con diámetro de 45 y 22 mm, que permite un giro de  $180^\circ$  suficiente para alcanzar el acimut. El servomotor es de relación 131:1 y con un encoder incremental de 64 pulsos por revolución, como lo muestra la Ilustración 37. Si consideramos que necesitamos un incremento de  $80^\circ$ , a partir de la línea norte-sur, entonces tendremos que el recorrido de la polea grande será de  $80^\circ$ , por estar acoplada directamente al eje, los diámetros de las poleas, nos proporciona la relación de velocidad y desplazamiento, por lo tanto tendremos para este caso que el ángulo al que debe moverse la polea de 22 mm es

$$\varphi = \frac{22}{45} 80^\circ = 39.11^\circ$$



*Ilustración 37 Diseño para el recorrido de la polea*

Y con la resolución del encoder y a la relación de la caja de engranes, calculamos el número de pulsos necesarios para que se coloque en esa posición.

$$No. = 64 \times 131 \times \frac{80}{360} = 1863.1 \text{ pulsos}$$

Los dos movimientos, es decir el horizontal y vertical nos proporcionan los dos grados de libertad necesarios para ubicar la posición del sol desde un punto específico. Recordemos que la altura solar la podemos alcanzar con un ángulo de 10 a 90° y el ángulo acimutal de 0 a 180°, suficientes en el caso del prototipo y los cálculos anteriores solo se muestran a manera de ejemplo.

El prototipo final, se muestra en la Ilustración 38, tiene los dos grados de libertad para las coordenadas necesarias para ubicar la posición del sol, contando con solo dos motores y están dos celdas solares de idénticas características, todo en aluminio a excepción de la base y los ejes.





*Ilustración 38 Diseño del prototipo*

## CAPÍTULO 4

### 4. Programación y Electrónica

#### 4.1 Introducción

En este capítulo se describe brevemente la programación grafica empleada, así como las estrategias diseñadas para la “Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio”, usando este lenguaje de programación. Se dan detalles de la electrónica empleada, así como el hardware empleado y las pruebas realizadas para su funcionamiento

#### 4.2 Lenguaje de programación

Existen varios lenguajes de programación gráfico, sin embargo se decidió usar el lenguaje llamado LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), debido a sus características, que se mencionaran más adelante pero sobre todo debido a que en la Universidad se inició el proceso de enseñanza de este lenguaje en las asignaturas de Informática Industrial e Instrumentación Digital.

Labview, es considerado un lenguaje y a su vez un entorno de programación gráfico en el que se pueden crear aplicaciones de forma rápida y sencilla, también se le llama lenguaje G, los lenguajes convencionales (C, Basic, Fortran) se basan en un modelo de programación imperativa, es decir una sucesión de operaciones o sentencias, el lenguaje G no usa este modelo, sino una ejecución basada en el flujo de datos (dataflow) .

Un programa en Labview consiste básicamente en una serie de funciones unidas mediante cables, los datos circulan o fluyen por los cables, y una función solo podrá ejecutarse cuando tenga disponibles todos los datos que le sirven como entradas. En otras palabras podemos decir que se favorece mucho el paralelismo en el procesamiento.

#### 4.2.1 Entorno de programación

Los programas desarrollados en “Labview” se llaman VI (Virtual Instrument), es decir instrumento virtual, dado que en sus inicios este programa estuvo orientado al control de equipos electrónicos, usados en instrumentación.

En general para el desarrollo de un instrumento virtual se generan dos ventanas que son: Panel frontal.- Es la carátula del instrumento con la que interactúa el usuario como se muestra en la Ilustración 39.

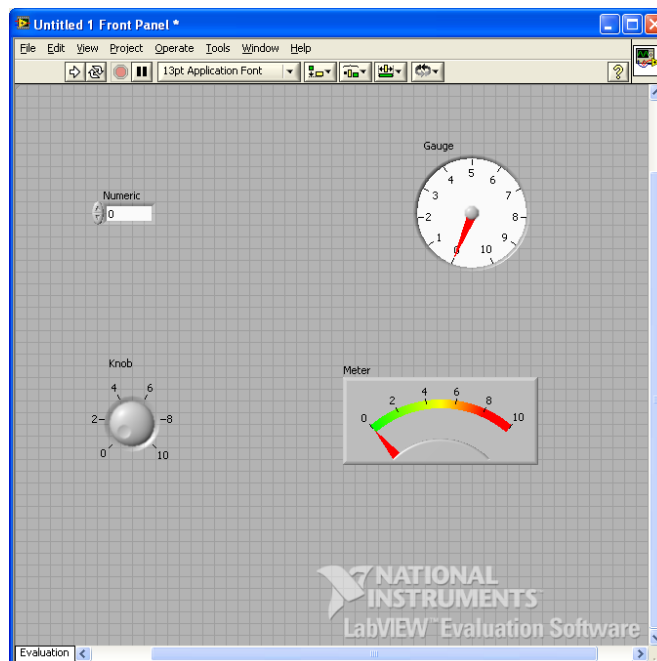
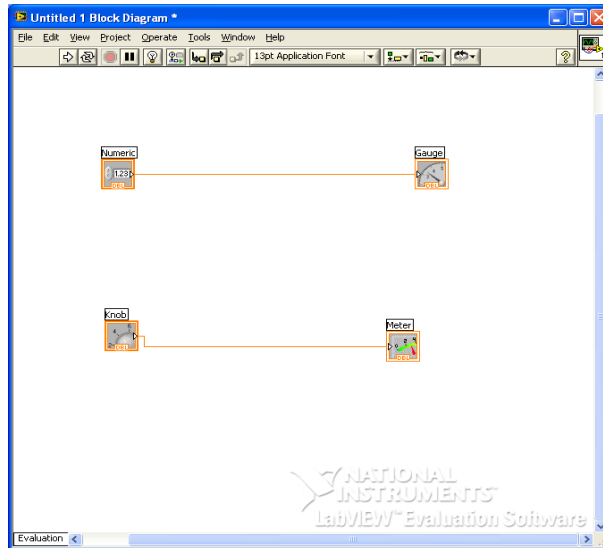


Ilustración 39 Panel frontal

Diagrama de bloques.- Donde se realiza la programación, estrategia de control y flujo de datos como lo muestra la Ilustración 40.



*Ilustración 40 Diagrama de bloques*

Ambos están conectados por terminales, es decir elementos de entrada y salida de tal forma que al poner un elemento en el panel frontal como un indicador de datos, este estará en el diagrama de bloques también, teniendo una relación directa.

Labview dispone de instrucciones de control al igual q otros lenguajes, que permiten ejecutar código de forma condicional o repetirlo varas veces a estas funciones se le llaman estructuras las básicas son las siguientes SEQUENCE, que nos permite ejecutar código en una secuencia deseada, CASE nos permite ejecutar código si la condición se cumple, WHILE repite el código hasta que se cumple una condición que es evaluada en cada interacción, FOR es semejante al anterior solo que se repite un número de veces previamente establecido y no se puede cambiar, EVENT detiene la ejecución del

programa hasta que ocurra un evento. Como ejemplo se muestra la estructura FOR en la Ilustración 41.

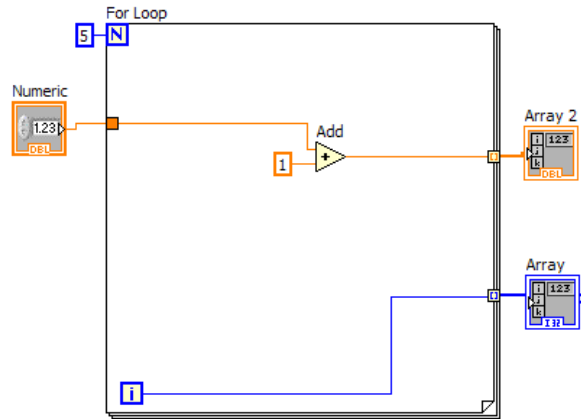


Ilustración 41 Programación de un ciclo "FOR"

### 4.3 Diseño de control módulo "Medición de corriente de corto circuito y voltaje de circuito abierto"

#### 4.3.1 Herramientas de programación

Una de las ventajas de haber usado la tarjeta USB 4704 de Advantech, es que tiene herramientas para programar la adquisición de datos para el ambiente de programación Labview por lo que se usaron en las estrategias de programación como se muestra en la Ilustración 42.

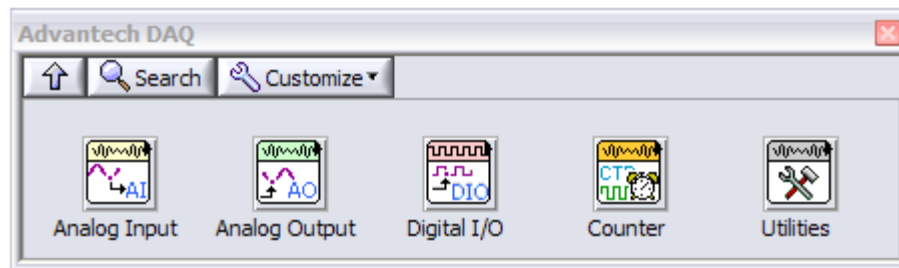


Ilustración 42 Conjunto de herramientas de la tarjeta USB 4704

En especial se programaron entradas analógicas (Analog Input) que tiene varias funciones como se muestra en la Ilustración 43 y 44.

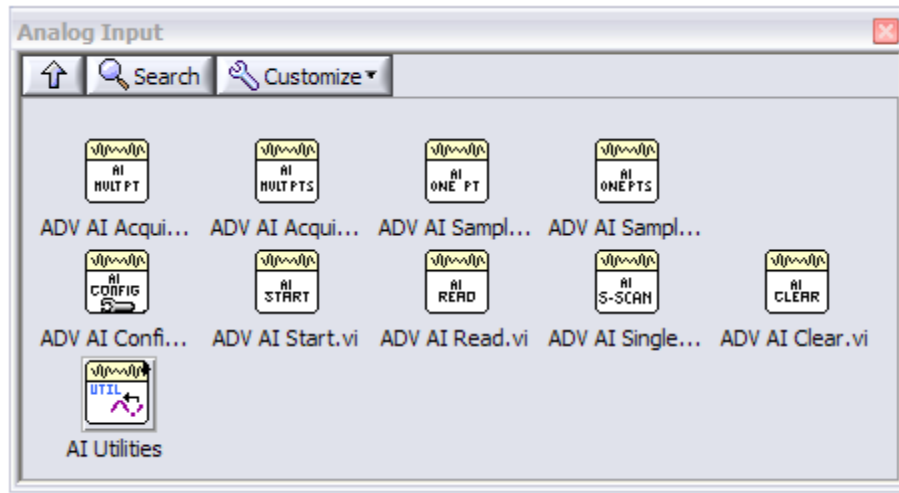


Ilustración 43 Herramientas de programación de entradas analógicas

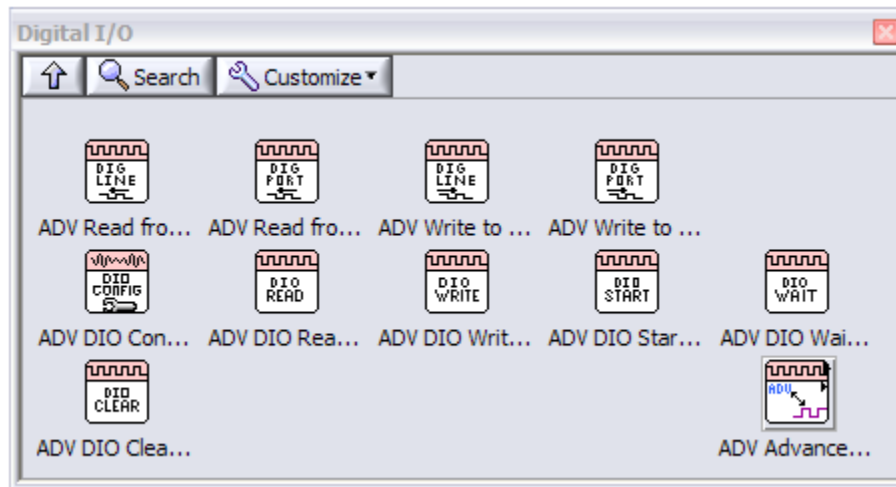


Ilustración 44 Herramientas de programación de entradas y salidas digitales

Las características de la tarjeta se muestran en el anexo, cabe mencionar que muestras más características sin embargo estas solo las que se utilizaron.

### 4.3.2 Descripción de la estrategia para la medición de voltaje y corriente.

La estrategia es sencilla, se abre un archivo nuevo, y a través de un ciclo “while”, se repite la secuencia de adquirir cada señal como un voltaje y aunque se mida corriente el transductor la convierte a voltaje porque la tarjeta mide solo tensiones. Se puso un reloj a través de la función “Wait”, cuyo parámetro es en milisegundos, para que realice la operación cada 15 minutos. La función “Format Into File” se le da formato a la salida del archivo, escribiendo los 4 datos de las señales y la hora de adquisición, que se obtiene con la función “Get Date”, que nos la da en formato “string”, a diferencia de los voltajes que están en formato de número flotante. La adquisición la realiza la función “ADV AI”, de la tarjeta, y mediante la función “Get XY Value” obtenemos su valor promedio de 1000 muestras. Se ilustra en la Ilustración 45.

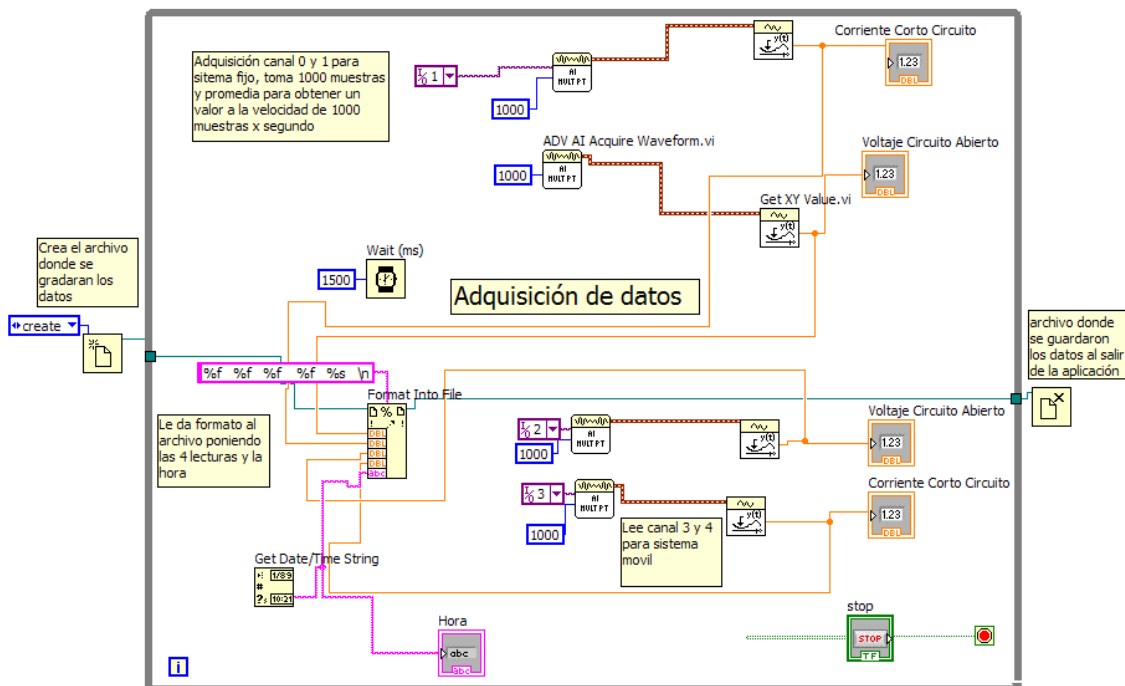
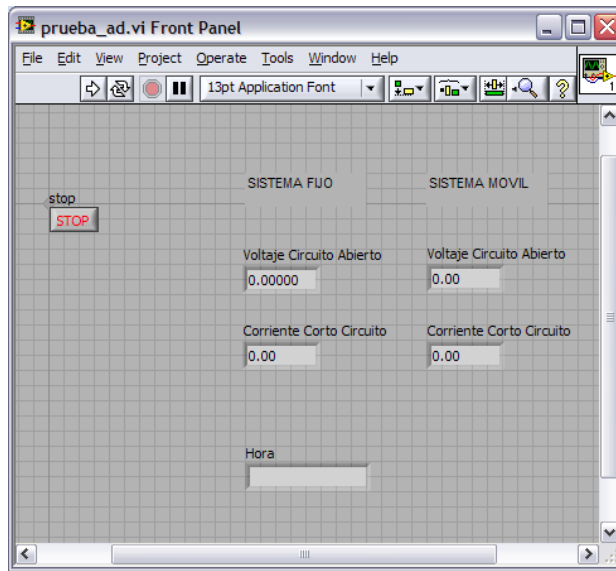


Ilustración 45 Estrategia de medición de señales

### 4.3.3 Prueba de funcionamiento

Se probó en vacío, es decir si alimentación y se hizo una corrida para verificar que efectivamente funcione adecuadamente el panel frontal de prueba se muestra en la Ilustración 46, nos muestra los voltajes de circuito abierto, tanto del sistema móvil, fijo y las corrientes de corto circuito. También nos imprime la hora, que toma del sistema.



*Ilustración 46 Panel frontal del módulo*

Cuando se inicia la corrida del programa (instrumento virtual), nos pide el nombre de un archivo, ahí guardara los datos de la medición como se muestra en las Ilustración 47 y 48, en ese archivo guardara primero los datos del voltaje y después de la corriente del sistema móvil, posteriormente, los del sistema fijo y por último la hora de captura, gravándolo en un archivo de texto (.TXT). Este programa solo se detendrá si se oprime el botón de paro (stop), de lo contrario está programado para no detenerse y gravar cada 15 minutos. En la imagen está programado cada 15 segundos, por eso aparecen 4 mediciones cada minuto, debido a que en el diagrama de bloques la función "WAIT" tiene el número 15000 y se programa en milisegundos, basta cambiarlo por el número adecuado al correr el programa.



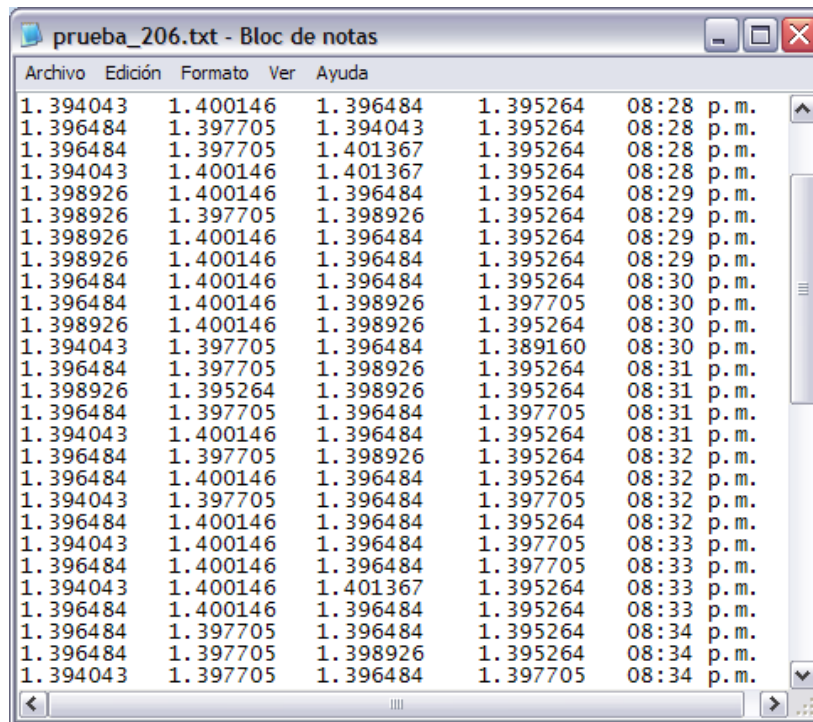


Ilustración 47 Archivo de salida de datos

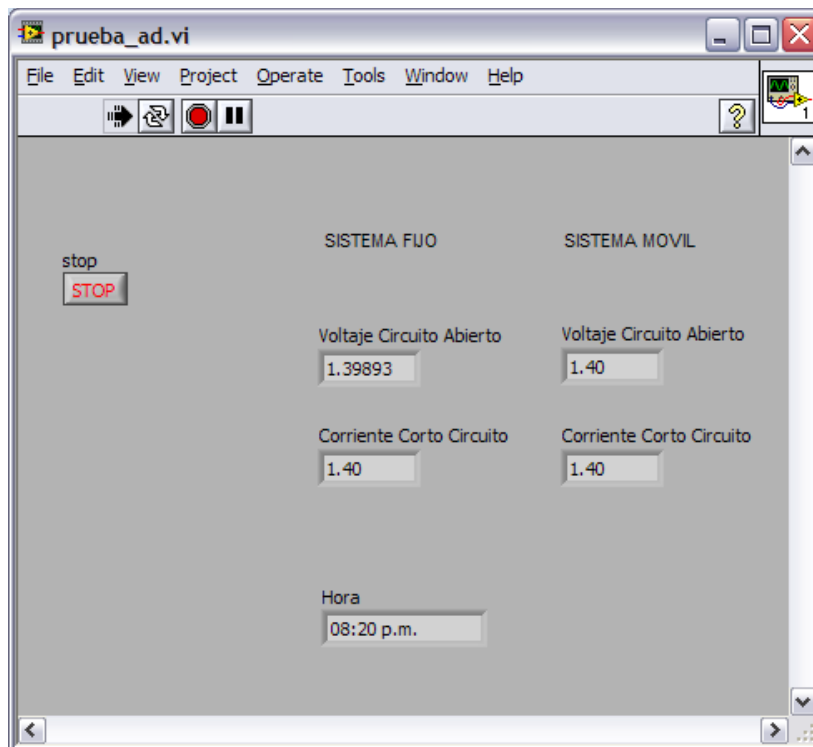


Ilustración 48 Panel frontal de la adquisición

# CAPÍTULO 5

## 5. Pruebas y Resultados

### 5.1 Pruebas

Se realizaron varias pruebas a los paneles solares tanto al sistema móvil como al sistema fijo, en ambos casos, se midió la temperatura mediante un termómetro infrarrojo, midiendo siempre la misma celda, para tener un referente del cambio de la temperatura, el sistema mide voltajes y corrientes de circuito abierto y corto circuito respectivamente, así como la irradiancia, se probó el panel solar en un día soleado y en uno nublado como lo muestran las gráficas.

#### 5.1.1 Prueba de eficiencia del panel solar

Como se mencionó, son celdas solares de 10 Watts y para medir su eficiencia a una hora determinada, se realizó lo siguiente: Se colocó en una posición arbitraria, y se midió la temperatura, el voltaje de circuito abierto, la corriente de corto circuito y la irradiancia, como lo muestra la tabla 4. El área de las celdas es 0.1032 m<sup>2</sup>. El procedimiento para calcular la eficiencia se basó en la medición de la potencia medida, dividida entre el área del panel solar, para encontrar la energía que estaba captando, se dividió entre el dato que nos dio el solarímetro y multiplicado por 100, para tener una eficiencia en porcentaje, es decir:

$$P = V_{ca}I_{cc} \dots \dots \dots [5.1]$$

$$H_0 = \frac{P}{A} \dots \dots \dots [5.2]$$

$$Ef = \frac{H_0}{H_m} \times 100\% \dots \dots \dots [5.3]$$

Donde:

P = Potencia del panel en Watts

V<sub>ca</sub> = Voltaje de circuito abierto

$I_{cc}$  = Corriente de corto circuito

$H_0$  = Irradiancia calculada

$H_m$  = Irradiancia medida

$Ef$  = Eficiencia en porcentaje

Tabla 4 Eficiencia de panel solar de silicio

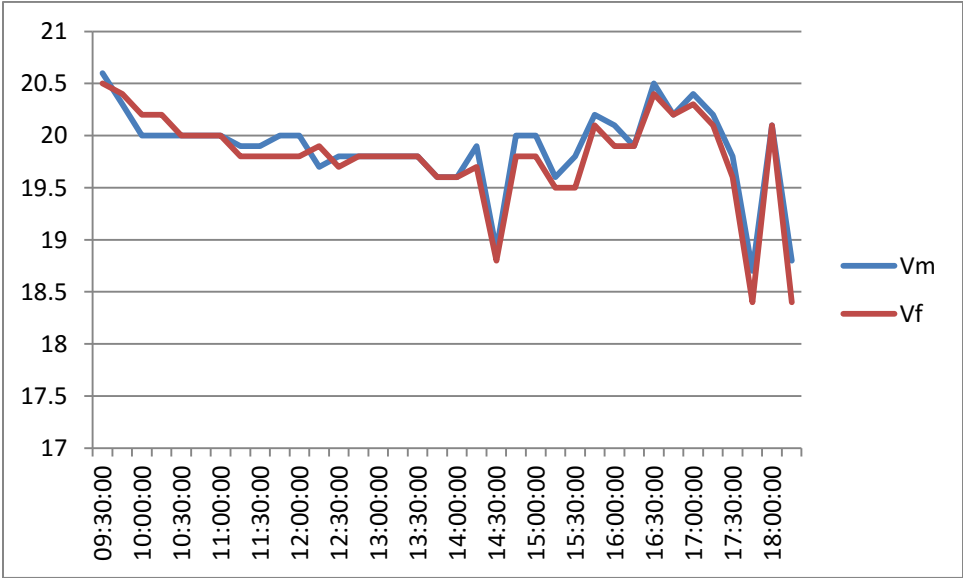
Prueba No.	Voltaje [Volts] $V_{ca}$	Corriente [Amp] $I_{cc}$	Temp. ° C	Potencia Watts P	Energ. Conv. $H_0$	Irrad. Watts/m <sup>2</sup> $H_m$	Eficiencia $Ef$ %
1	20	0.76	47	15.200	147.28	1350	10.9
2	19.5	0.71	50	13.845	134.15	1140	11.76
3	20.3	0.63	43	12.789	123.92	1080	11.47
4	19.67	0.67	48	13.1789	127.70	1100	11.60
6	20.6	0.44	39	9.0640	87.82	825	10.64
7	20.4	0.40	39	8.1600	79.06	650	12.16
8	20.5	0.28	32	5.7400	55.62	610	9.118
Prom	20.13					Prom	11.09

Las pruebas se realizaron en un día soleado, escogido aleatoriamente y se probaron las celdas individuales dando resultados semejantes. De los resultados y sacando el promedio general para voltaje, nos muestra que este parámetro varía muy poco con la irradiancia, así como con la temperatura. La corriente sí varía con la irradiancia directamente y es lo que determina la potencia generada por el panel solar y por consiguiente el parámetro  $H_0$  se ve afectado. La temperatura afecta la generación de energía aunque en esta prueba no se puede evaluar el comportamiento con precisión como lo muestran los resultados, debido a que las condiciones no son controladas, y en ocasiones circulan corrientes de aire. El promedio de la eficiencia es de 11.09 %, desde

luego que el comportamiento de la eficiencia en todos los casos es muy semejante y el fabricante nos da el dato como el 12 % bajo una prueba estándar.

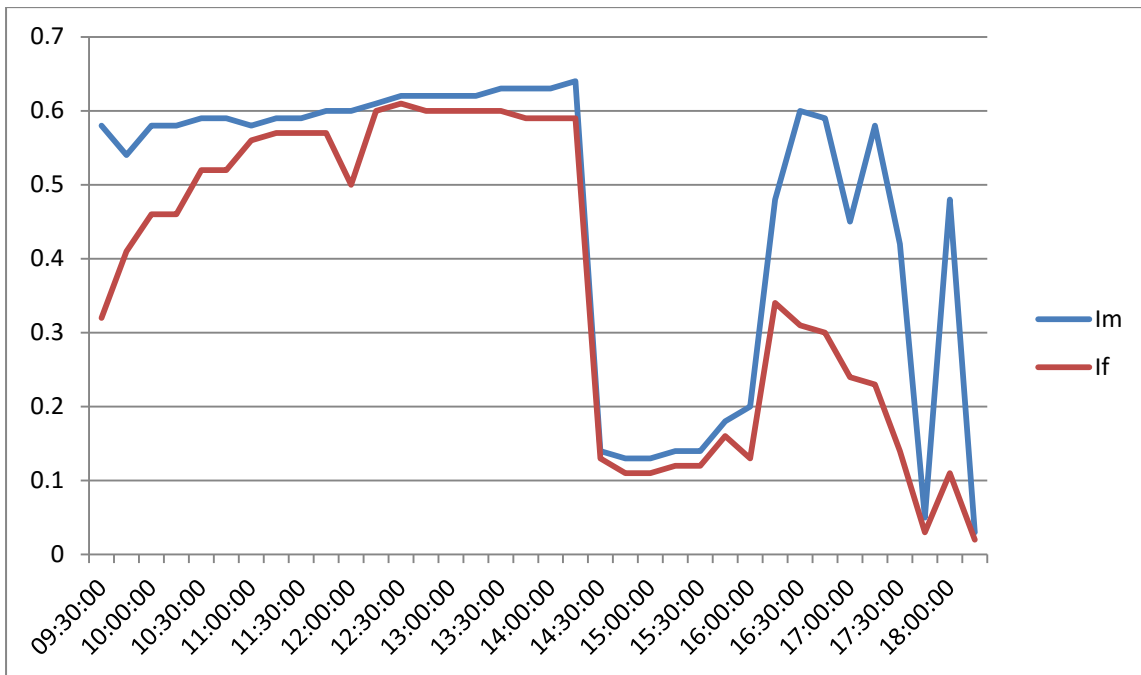
### 5.1.2 Medición de la eficiencia del panel solar seguidor y fijo

En esta prueba se compara el sistema seguidor del sol, con un sistema fijo, en ambos casos se miden los parámetros de circuito abierto, corriente de corto circuito, temperatura e irradiancia. Las mediciones se realizaron de 9:15 am a 6:15 pm, en las coordenadas 19.0914099, -98.1275358, del día 23 de agosto de 2015. Se muestran los resultados en las gráficas siguientes.



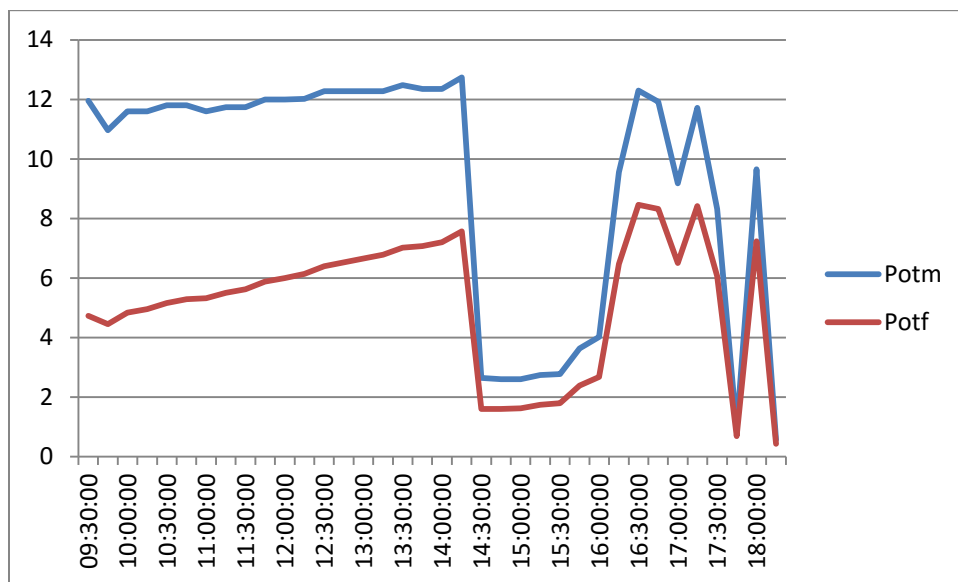
Gráfica 1 Comparación del voltaje sistemas móvil y fijo

En la gráfica 1 se puede observar que el voltaje no varía significativamente para ambos sistemas los picos que se aprecian es por la aparecen de nubes y tapan el paso de los rayos solares, el valor oscila entre 18.4 y 20.5 volts y el perfil es semejante.



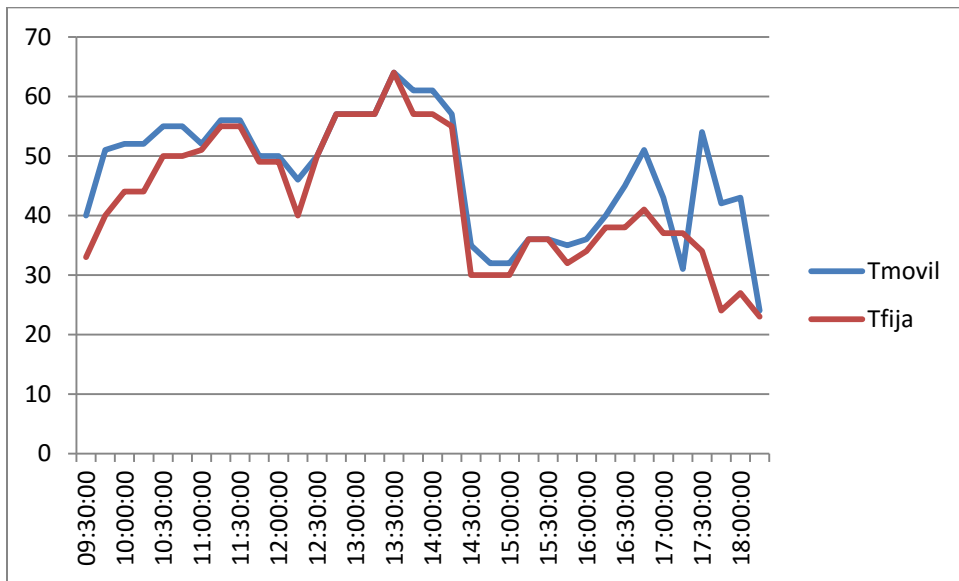
Gráfica 2 Comparación de corrientes de corto circuito

La corriente es semejante entre ambas, aunque se ve que una banda pequeña donde cae prácticamente a 0.1 de corriente, es debido al cruce de una nube y en la siguiente parte sale nuevamente a las 4:30, y se nota que el sistema fijo (línea roja) ya no muestra la misma cantidad de corriente.



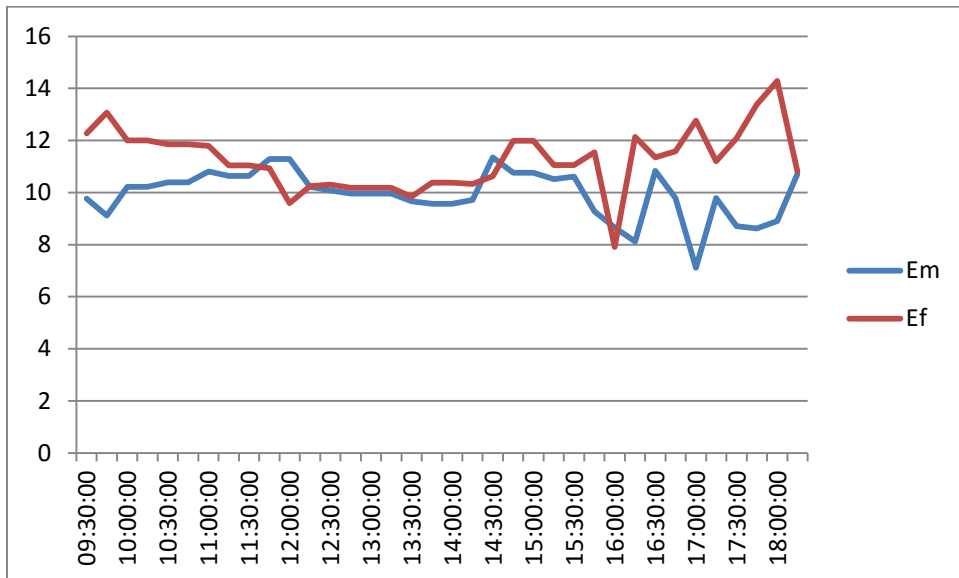
Gráfica 3 Comparación de potencia generada

La potencia generada por cada sistema se muestra en la gráfica 3, en ella se nota que el sistema fijo siempre genera menos que el móvil.



Gráfica 4 Comparación de temperaturas

Las temperaturas son semejantes en el periodo de mayor incidencia de sol, es decir para este caso de las 11:00 a las 14:00 y cuando aparece la nube prácticamente se hacen iguales, son diferentes en las primeras horas del día y las últimas.

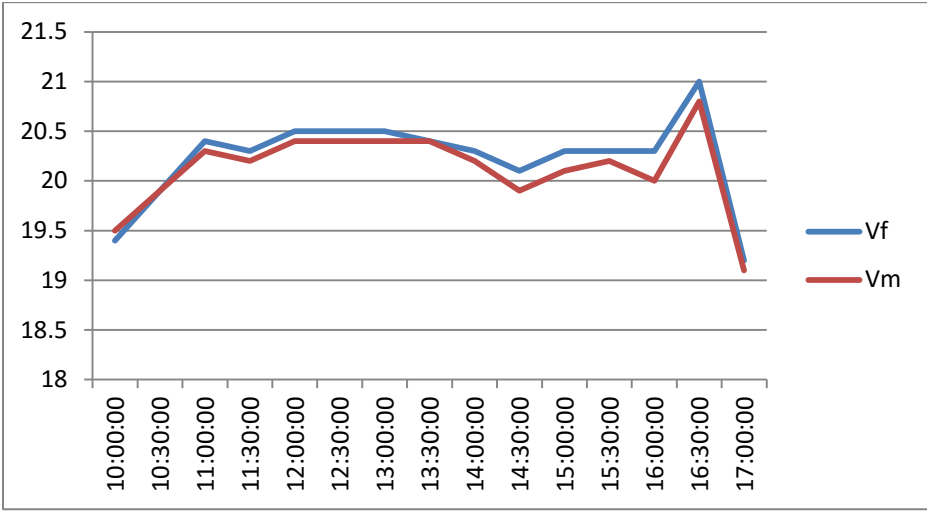


Gráfica 5 Comparación de la eficiencia

La eficiencia es semejante y en algunos casos es mayor al sistema móvil, eso no quiere decir que el sistema fijo genere más voltaje que el móvil, solo implica que de la energía que recibe, convierte un porcentaje mayor en energía eléctrica.

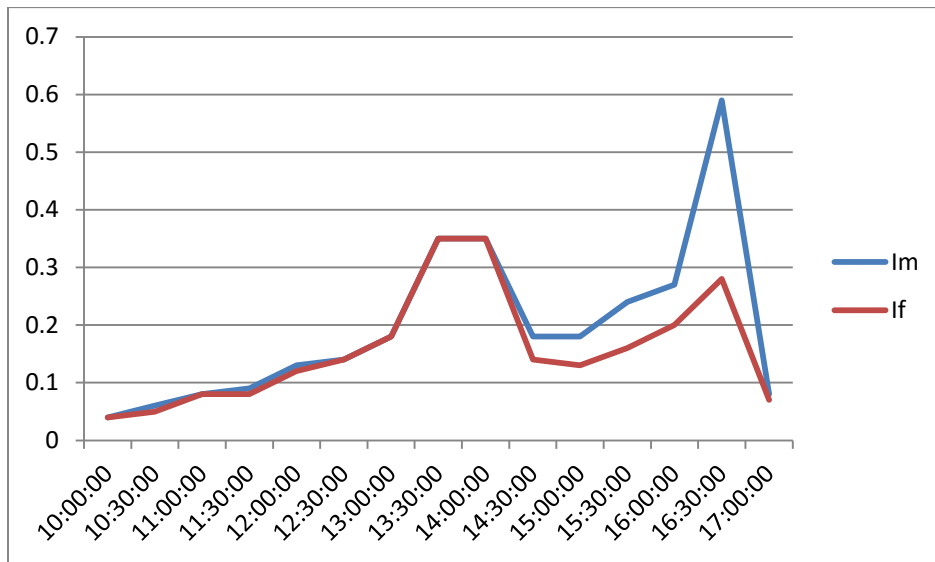
### 5.1.3 Medición de la eficiencia en un día nublado

Esta prueba se llevó a cabo el día 13 de septiembre, totalmente nublado, de 10:00 a 17:00, en intervalos de 30 minutos. Cabe recordar que el sistema solo mide corrientes y voltajes, la temperatura y la irradiancia se toma con instrumentos.



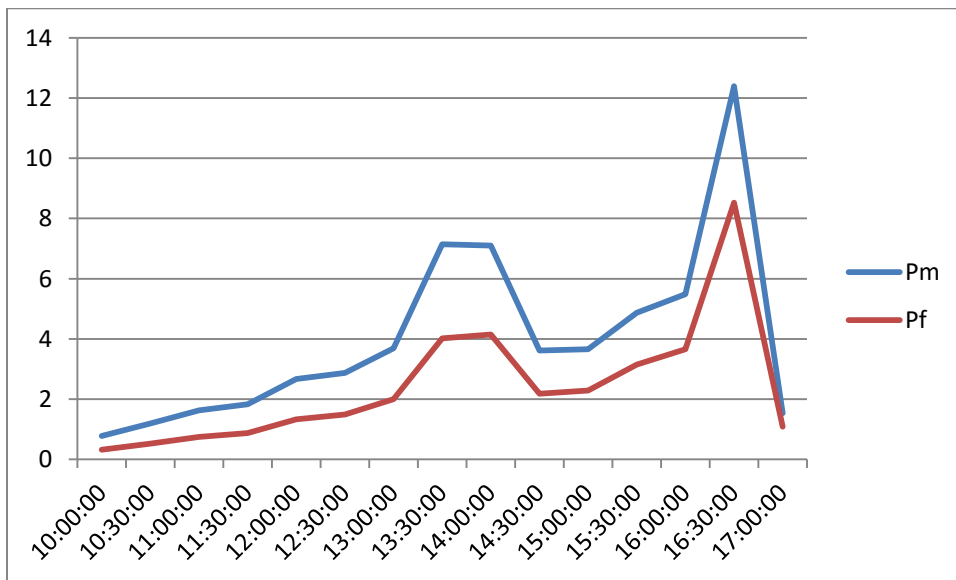
Gráfica 6 Comparativa de voltajes

Los voltajes, al igual que en la primera prueba semejantes. Y solo varían ligeramente cuando el sol aparece ligueramente. Solo cuando es una oscuridad notable es cuando el voltaje va cayendo, de lo contrario si permanece casi invariable.



Gráfica 7 Comparativa de corrientes.

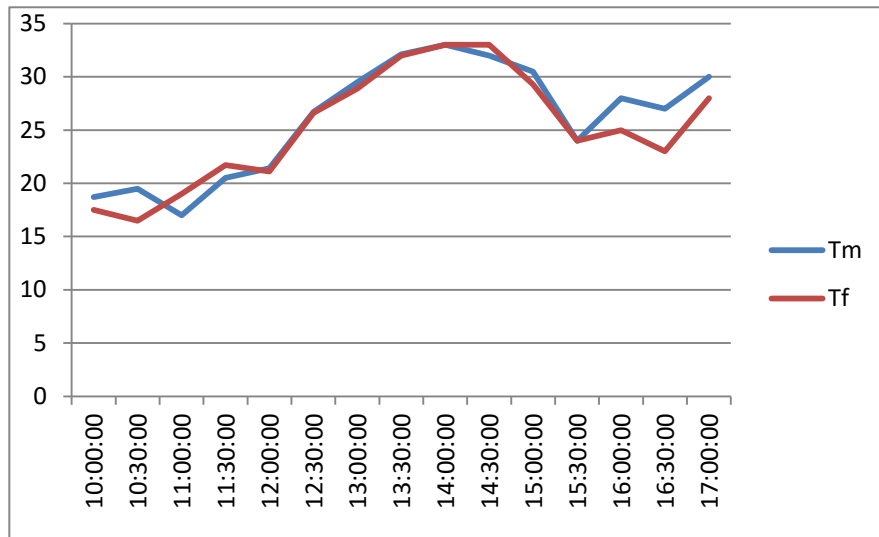
El comportamiento de la corriente cuando está nublado es muy similar para ambos casos, y solo varía muy ligeramente, cuando el sol aparece se nota la diferencia, porque aunque los dos aumentan lo hacen en diferente proporción, como lo muestra la gráfica.



Gráfica 8 Comparativa de potencias de un sistema móvil y fijo.

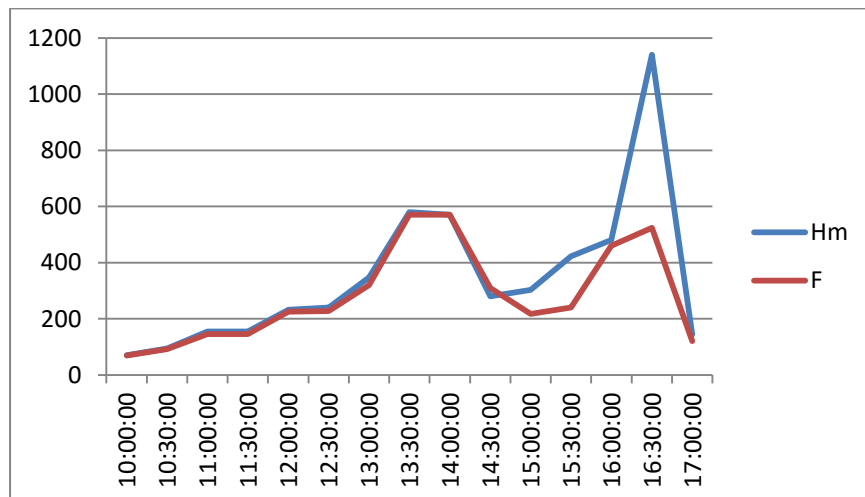


Referente a la potencia, debido a que es el producto de la corriente y el voltaje, y este último permanece casi constante, el perfil es muy similar como se muestra en la figura y siempre es mayor para el sistema móvil.



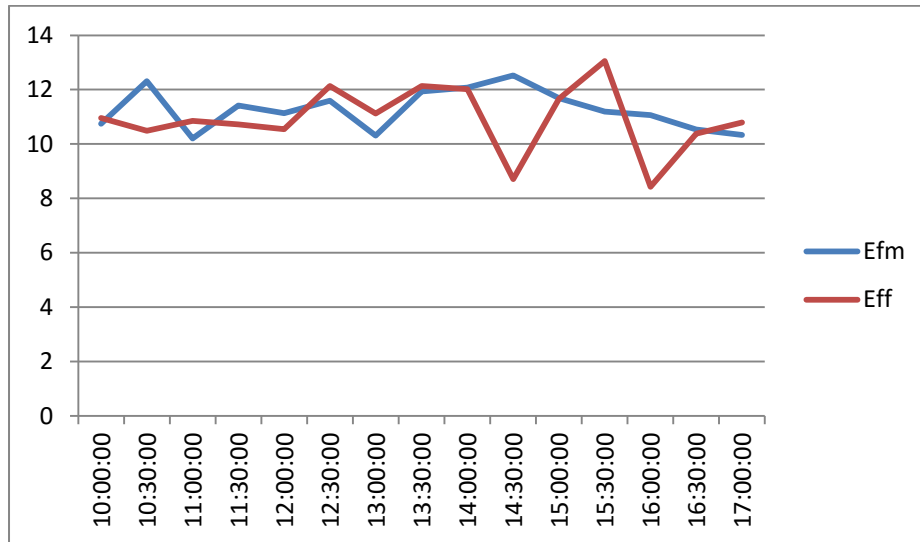
Gráfica 9 Comparativo de temperaturas.

Las temperaturas son prácticamente las mismas, cambiando únicamente cuando el sol sale, y debido a que le da perpendicularmente al sistema móvil



Gráfica 10 Irradiancias

La irradiancia para un día nublado es semejante para ambos sistemas y solo cambia cuando aparece el sol, esto lo podemos atribuir a que la luz no llega directamente.



Gráfica 11 Comparativo de la eficiencia del sistema móvil y fijo.

Se aprecia en la gráfica 11 que en un día nublado la energía generada es la misma y difiere cuando solo cuando hay sol.

## 5.2 Conclusiones

El voltaje no varía significativamente con el cambio de la irradiancia, es necesario oscurecer ya de forma considerable para que el voltaje se vaya a un valor de cero, sin embargo si lo hace con la temperatura.

La corriente si varía significativamente con la irradiancia de hecho es el factor que determina la potencia generada, debido a que el voltaje permanece casi constante.

En días nublados la eficiencia para un sistema móvil y un sistema fijo es muy similar, y es debido a que a ambos solo les llega radiación difusa y no directa.

La generación en condiciones normales de irradiancia (no nublado) es aproximadamente un 20% más de energía para el sistema móvil según los datos obtenidos para este tipo de paneles solares.

Cabe mencionar que para la realización de este trabajo también se apoyó en las siguientes normas:

NMX-J-643-1-ANCE-2011

NMX-J-643-10-ANCE-2011

NMX-J-643-11-ANCE-2011

NMX-J-643-5-ANCE-2011

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Formación Profesional en Energías Renovables.** Autor: Ana Madrid Cenzano, Luis Esteire Gereca, Antonio Madrid Vicente, Javier Madrid Cenzano, Estíbaliz Cenzano del Castillo y Eva Esteire Madrid.

**Ingeniería Fotovoltaica.** Autor: Eduardo Lorenzo (Profesor del Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid).

**Labview. Programa para Sistemas de Instrumentación.** Joaquín del Río Fernández, Shahram Shariat-Panahi. Editorial AlfaOmega México 2013.

**Energías Renovables.** Jaime González Velasco. Editorial Reverté S.A.

Barcelona 2009.

**Física para Ciencias e Ingeniería Volumen 2.** Raymond A. Serway, Jhon W. Jewett. Jr. Editorial Cengage Learning. México 2015.

**Energía Solar Fotovoltaica.** Miguel Ángel Sánchez Maza. Editorial Limusa México 2014.

**Instalaciones Solares Fotovoltaicas.** Agustín Castejón Oliva, Germán Santamaría Herranz. Editex. Madrid 2010.

**Manual de Programación.** Module Data Acquisition Module. USB-4704. 14 bits multifunction. Advantech 2015

**Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley.** Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. Editorial Mc Graw Hill octava edición México 2018.

**Análisis Básico de Circuitos en ingeniería.** J. David Irwin Editorial Prentice Hall Quinta Edición México 1997.

**Diseño de Maquinaria.** Síntesis y Análisis de Máquinas y Mecanismos. Robert L. Norton. Mc Graw Hill Educación. Quinta Edición. México 2013