



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

**“SISTEMA FOTOVOLTAICO DE BAJA POTENCIA  
PARA INVERNADEROS INTELIGENTES”**

**TESIS QUE COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES  
PRESENTA:**

**RUFINO GARCÍA MENDOZA**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. DOMINGO JOSÉ GÓMEZ MELENDEZ**

**CHIHUAHUA, CH. MAYO, 2013**

## DEDICATORIAS

*A mi padre, “Don Andrés”, quien ha sido mi ejemplo de fortaleza e inspiración para seguir siempre adelante. A mis hermanos por el apoyo incondicional en todos los proyectos personales y profesionales que saben bien que hemos realizado juntos. A mis sobrinos por alimentar cada semana con sus sonrisas mi vida.*

*Especialmente en memoria de mi madre “Doña Félix”, quien ha sido mi Ángel de la guarda desde que te fuiste al cielo.*

†

*Siempre te recordare por tu fortaleza, tu dedicación, tu nobleza, tu amor y tu ejemplo de vida, que junto a Don Andrés nos heredaste el mejor de los tesoros del mundo.*

# AGRADECIMIENTOS

A dios, por darme la oportunidad de vivir y seguir adelante con sus bendiciones.

A mi familia, por su apoyo incondicional y creer en mis proyectos que son sus proyectos.

A la Universidad Tecnológica de San Juan del Río, por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, además del gran apoyo durante el proceso de la maestría.

A la Universidad Politécnica de Querétaro, por permitirme desarrollar el proyecto de Tesis.

Al Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV), por darme la oportunidad de cursar la Maestría en Energías Renovables.

A los profesores del CIMAV, por compartir sus conocimientos y experiencias durante este proceso.

A mi asesor de tesis Dr. Domingo José Gómez Meléndez, por sus asesorías y enseñanzas, además del apoyo en equipamiento para la realización de este proyecto.

Al Dr. José Alberto Duarte Moller, por su valioso apoyo y permitirme ser parte de esta aventura llamada Maestría en Energías Renovables.

A mis compañeros de maestría, por su amistad y confianza, que me permitieron convivir y conocer los excelentes seres humanos que son.

# RECONOCIMIENTOS

Al Dr. Marco Antonio Zamora Antuñano, M. en C. Bernardo Ramírez Piñeiro, M. en C. Marco Antonio Olivo Flores, Ing. Rufino Alberto Chávez Esquivel, Dr. Juan Manuel Olivares, María Teresa Rivera Nava, por el apoyo brindado durante el desarrollo de la Maestría.

# INDICE

DEDICATORIAS.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RECONOCIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE.....	iv
RESUMEN.....	1
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1. Radiación Solar.....	5
1.2. Movimientos de la Tierra.....	9
1.3. Sistema Fotovoltaico.....	13
1.4. Invernaderos Inteligentes.....	23
1.5. Problema.....	26
1.6. Objetivo General.....	26
1.7. Objetivos Específicos.....	26
1.8. Hipótesis.....	27
1.9. Metodología.....	28
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>30</b>
<b>2. MARCO TEORICO.....</b>	<b>30</b>
2.1. Efecto Fotovoltaico.....	30
2.2. Seguidor Solar.-.....	42
2.3. Control Difuso.-.....	57
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>64</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>64</b>
3.1. Radiación solar sobre una superficie.....	64
3.2. Localización geográfica del estado de Querétaro.....	71
3.3. Estudio de disponibilidad del recurso solar en San Juan del Río..	75
3.4. Estudio energético del Invernadero Inteligente.....	82
3.5. Diseño del seguidor.....	88
3.6. Diseño de la estructura del seguidor.....	98

<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>108</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>108</b>
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>109</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>109</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>112</b>

## **RESUMEN.-**

Debido a las exigencias del mercado de exportación, donde México tiene que competir con países más avanzados y el éxito de estos agro-negocios reside en tener una mayor calidad y alta productividad; una opción para nuestro país es tecnificar su producción de hortalizas en invernadero a través del desarrollo de sistemas de control climático más avanzados, incluyendo sistemas fotovoltaicos para energizar estos procesos y tener un sistema autónomo y sustentable, en zonas rurales donde el uso de energía eléctrica convencional no existe. El presente trabajo describe un sistema de conversión de energía, que permite la transformación directa de la energía solar a eléctrica, denominado Sistema Fotovoltaico. En este proyecto se utilizará la energía solar para producir la electricidad que es consumida por la carga eléctrica instalada en invernaderos inteligentes, el objetivo es desarrollar un sistema sustentable de baja potencia, basado en el estudio energético, paneles fotovoltaicos, seguidor solar, sistema de almacenamiento de energía, para su aplicación en invernaderos inteligentes o instalaciones de baja potencia. Se presenta el desarrollo del estudio energético de invernaderos inteligentes, mediante el cálculo y mediciones de las diferentes variables que integran el sistema, posteriormente se realiza la instalación electrónica, control y funcionamiento del sistema fotovoltaico acoplado a un invernadero inteligente. Además de un algoritmo de Control con lógica difusa, mediante el control de variables tales como, la irradiación, la potencia, la posición y orientación del tracker con referencia al sol. Se logra obtener una potencia eléctrica de 1080 watt, suficiente para alimentar invernaderos inteligentes, que permite el funcionamiento de una bomba de  $\frac{3}{4}$  H.P., iluminación y un sistema de control y actuadores con un consumo de corriente de 1 A. Se presentan los resultados que muestran el desempeño del modelo matemático y del controlador inteligente, así como, el prototipo funcional del sistema desarrollado, la transferencia tecnológica y los productos obtenidos a raíz del mismo.

**Palabras Claves:** Paneles Fotovoltaicos, seguidor solar, invernadero inteligente, Control Lógico Borroso.

## **SUMMARY.**

Due to export requirements where Mexico has to compete with more advanced countries the success of these agricultural businesses lies in the ability to have better quality and productivity. One option for our country is to grow vegetables under glass through the development of a more advanced climate control systems including photovoltaic systems to energize the process and have an autonomous and sustainable system in rural areas where there is no electricity. This work describes an energy conversion system that allows the direct transformation from solar energy to electricity. It is called a photovoltaic system. In this project solar energy is used to produce electricity that is consumed by the installed electric load that is in the intelligent greenhouse. The objective is to develop a low-power sustainable system based on the following; energy study, photovoltaic systems, solar tracker and an energy storage system for its application in intelligent greenhouses or low-power facilities. The development is presented through the energetic study of intelligent greenhouses by calculation and measurement of different variables that comprise the system. Later the electronic installation was performed and the control and operating system of the photovoltaic was coupled to the intelligent greenhouse. Also, a algorithm control with fuzzy logic was added by the control of variables such as, irradiation, power, the position and orientation of the tracer with a sun reference. We obtained an electrical power of 1080 watt, it was sufficient to feed an intelligent greenhouse that allows the pump to function with  $\frac{3}{4}$  H.P. , a lighting control system and actuators with a current consumption of 1 A. The results that show the performance of the mathematical model and the intelligent control are presented as well as the functional prototype system developed, the technology transferred and the products received from the same.

**Key words:** photovoltaic panels, solar tracker, intelligent greenhouse, fuzzy logic Control.



# CAPÍTULO I.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La historia del hombre es la historia de la búsqueda permanente de fuentes de energía y de sus formas de aprovechamiento, con el propósito humano de servirse del ambiente. Actualmente la demanda energética ha crecido a un ritmo acelerado e imparable al tiempo que baja la eficiencia y aumentan descontroladas las emisiones de gases de efecto invernadero, pues se vive en una sociedad que está regida por el consumo de combustibles fósiles para satisfacer sus necesidades energéticas. El desarrollo de la humanidad a través de la historia esta ligado de manera muy significativa al tipo de energía utilizada y sus formas de aprovechamiento. Existen incluso teorías que posicionan a la energía como eje principal del desarrollo humano, como la expuesta por Leslie White: *“La historia de la civilización es la del dominio de las fuerzas de la naturaleza por medios culturales, de tal forma que la cultura evoluciona conforme aumenta la energía aprovechada per cápita en un período dado y la eficiencia de los medios instrumentales para servirse de ella”* (Cunningham, 2003).

El modelo energético actual a base de combustibles fósiles como principal fuente, genera un gran impacto ambiental y no es sustentable debido a que, para satisfacer las demandas de energía actuales, compromete la integridad de las futuras generaciones. Por lo que se hace necesario establecer un nuevo modelo energético que sea sustentable en el que las energías renovables sean el eje de desarrollo. Las fuentes de energía renovables tienen un ciclo de regeneración mayor al de consumo, por lo que son inagotables. El Sol es el origen de todas las energías renovables presentes en la Tierra (Merino, 2007.)

Actualmente la tecnología de las energías renovables aún se encuentra en una etapa de desarrollo con el objetivo final de lograr que la energía producida compita económicamente con la generada por las fuentes de energía no renovables

(Hollander, 2003). En particular para la energía solar fotovoltaica el desarrollo se centra principalmente en mejorar su eficiencia y garantizar un almacenamiento adecuado de la energía producida (Luque Antonio, 2003), problemas sobre los cuales se enfoca este trabajo de tesis.

Por otra parte, en México la industria de invernaderos presenta un grado de desarrollo tecnológico muy bajo, a diferencia de países desarrollados como Holanda, España, Canadá o Israel; en donde el control automático de invernaderos es una práctica común. En nuestro país lo predominante es el control manual del ambiente y algunos pocos invernaderos equipados con dispositivos mecánicos y controles simples, que, trabajan a través de niveles máximos y mínimos de las variables climáticas. El uso de esta tecnología conlleva a productividades mayores a las de cielo abierto, aunque no las logradas en otros países como Holanda, donde introducen otras técnicas en sus sistemas. Por ejemplo, la introducción en México de invernaderos con sistemas de ventilación manual y sensores simples, ha logrado aumentos en el rendimiento de hasta 13 kg/m<sup>2</sup> [Domínguez et al., 1998], una mejor administración del cultivo y sistemas de control pueden lograr rendimientos de 16 kg/m<sup>2</sup> (Pérez, 1998).

Sin embargo, Holanda obtiene rendimientos de 78 kg/m<sup>2</sup> (LEIDLO, 1996). En términos generales, podemos decir que la producción en los invernaderos mexicanos se ha caracterizado por la aplicación de conocimientos empíricos predominantemente y muy poco ha estado basada en la aplicación de conocimiento científico. Actualmente debido a las exigencias del mercado de exportación, donde México tiene que competir con países más avanzados y el éxito de estos agro-negocios reside en tener una mayor calidad y alta productividad; una opción para nuestro país es tecnificar su producción de hortalizas en invernadero a través del desarrollo de sistemas de control climático más avanzados.

## 1.1. Radiación Solar.

Casi toda la energía de que disponemos proviene del Sol. Él es la causa de los vientos, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, de los saltos de agua. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de los vegetales y de los animales que con el paso de los siglos han originado combustibles fósiles como el carbón o el petróleo. La radiación solar tiene otra importancia capital: otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa no son más que manifestaciones indirectas de ésta.

La radiación solar interceptada por la Tierra constituye la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. La cantidad de energía solar captada por la Tierra anualmente es aproximadamente de  $5,4 \times 10^{24}$  J, una cifra que representa 4500 veces la energía que se consume.

La energía solar llega a la superficie de la Tierra por dos vías diferentes: incidiendo en los objetos iluminados por el Sol, denominada radiación directa, o por reflexión de la radiación solar absorbida por el aire y el polvo atmosférico, llamada radiación difusa. La primera es aprovechable de forma directa, mientras que las celdas fotovoltaicas aprovechan la segunda.

A pesar de su abundancia, el aprovechamiento de la energía solar está condicionado principalmente por tres aspectos: la intensidad de la radiación solar recibida por la tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada lugar. La utilización provechosa de la radiación solar como fuente de energía está directamente ligada a la situación geográfica del lugar escogido para aprovecharla y de las variaciones temporales.

En general, el término de radiación solar se refiere a los valores de irradiación solar, es decir, la cantidad de energía recibida por unidad de superficie en un

tiempo determinado. Estos valores normalmente expresan la energía que proviene de la radiación directa del disco solar y la radiación difusa que, esparcida por la atmósfera, proviene del resto del cielo. La proporción entre radiación directa y difusa varía según las condiciones climáticas, y, en días nublados, la radiación difusa puede llegar a anularse.

La radiación solar es una forma de energía de baja concentración, ya que fuera de la atmósfera la intensidad de radiación solar que recibe la Tierra oscila entre los 1.300 y los 1.400 W/m<sup>2</sup> aproximadamente. Las pérdidas a la atmósfera por reflexión, absorción y dispersión reducen este valor alrededor de un 30%, con una intensidad de radiación por parte de la Tierra de alrededor de los 1.000 W/m<sup>2</sup>. Estos valores pueden variar dependiendo en las condiciones climatológicas. Por ejemplo, en un día sin sol, los valores de intensidad de radiación se pueden reducir hasta los 150 o 50 W/m<sup>2</sup>. Esta baja densidad de radiación y el efecto negativo de determinadas condiciones climatológicas obliga a utilizar superficies de captación grandes si se quieren conseguir valores significativos de aprovechamiento energético.

La radiación incidente sobre una superficie se suele medir a través de solarímetros. A partir de series temporales de medidas de radiación se elaboran mapas de radiación solar, a partir de los cuales se pueden realizar estimaciones de la radiación solar incidente sobre territorios determinados, durante periodos de tiempo limitados, simplemente multiplicando los valores leídos en el mapa por la superficie de la zona y por el período de tiempo dado.

También a partir de series de medidas se confeccionan manuales que reúnen tablas de valores de radiación sobre superficies con una determinada orientación e inclinación para diferentes microclimas. A través de éstos se obtienen estimaciones de la radiación solar incidente sobre una superficie plana con una orientación e inclinación dadas. La forma más usual para representar las variaciones temporales de radiación solar incidente sobre una superficie es a partir

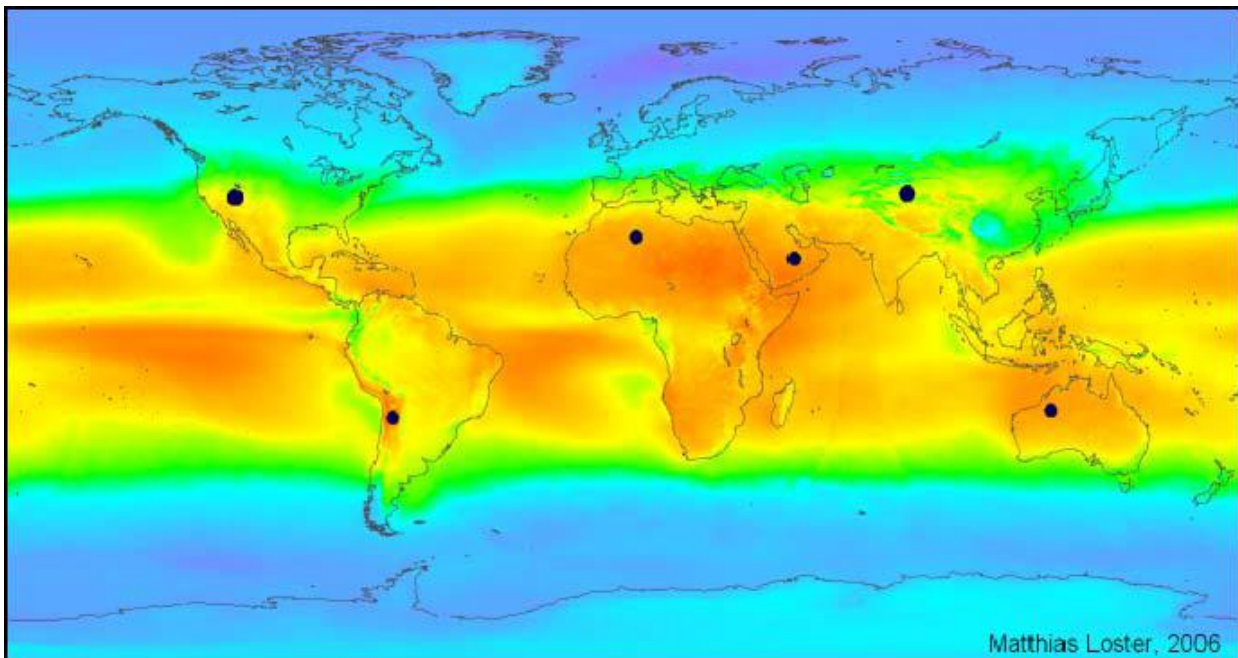
de las distribuciones de frecuencia de los valores diarios y las curvas de duración de potencia, que no son otra cosa que la acumulación de los valores de las distribuciones de frecuencia.

Respecto al aprovechamiento de la energía solar, se puede hablar de dos tipos de sistemas: los que convierten la radiación solar en electricidad mediante tecnología fotovoltaica y los que se utilizan para la producción de energía térmica. También cabe considerar la posibilidad de hacer un uso más global de la radiación solar, la luz natural y las condiciones climatológicas concretas de cada emplazamiento en la construcción de edificios mediante lo que se ha llamado arquitectura bioclimática.

La energía solar fotovoltaica se capta a través de unas celdas fotovoltaicas que convierten los rayos solares en energía eléctrica. Esta modalidad de aprovechamiento de la energía solar es la más recientemente desarrollada entre los diferentes tipos de energías renovables y tiene un campo de aplicación muy amplio: desde la utilización en productos de consumo, como relojes y calculadoras, hasta la electrificación de zonas sin suministro convencional, como casas aisladas o instalaciones agrícolas y ganaderas, pasando por las señalizaciones terrestres y marítimas, las comunicaciones o el alumbrado público. La transformación directa de la energía solar en electricidad mediante la conversión fotovoltaica presenta ventajas claras, teniendo en cuenta su sencillez, autonomía, fiabilidad y operatividad y están relacionadas con la elevada cantidad energética de la electricidad producida y la ausencia de impacto medioambiental y de ruidos en el proceso energético.

A pesar de todo, de momento, la participación actual de la energía fotovoltaica en el balance energético internacional es todavía marginal. Su costo de inversión es por ahora más elevado que el de las alternativas convencionales, pero experimenta una rápida reducción y se espera que en los próximos años el mercado internacional crezca a un ritmo de entre un 15 y un 25% anual.

El Sol es la fuente principal de energía del planeta, la temperatura y presión en el interior del Sol da origen a reacciones nucleares que liberan enormes cantidades de energía que llega al planeta de forma directa o difusa reflejada en las partículas de la atmósfera, en las nubes y demás objetos en el ambiente [Clark, 2004]. La disponibilidad de esta energía depende de la ubicación geográfica del lugar en donde se quiera aprovechar, en la Figura 1 se pueden observar los lugares en donde existe un mayor potencial de la energía solar para su aprovechamiento [Loster, 2006].



**Figura 1.1 Recurso solar a nivel mundial.**

La forma en que esta energía se transforma, almacena y se utiliza da origen a las formas de energía existentes en el planeta de manera natural:

- Biomasa.- La fotosíntesis en las plantas les provee de alimento.
- Energía hidráulica.- El ciclo del agua es ordenado por el Sol.

- Energía eólica.- El calentamiento del aire da origen a las diferencias de presión que provoca los vientos.
- Corrientes marinas. La diferencia de temperatura en los mares da origen a este movimiento.

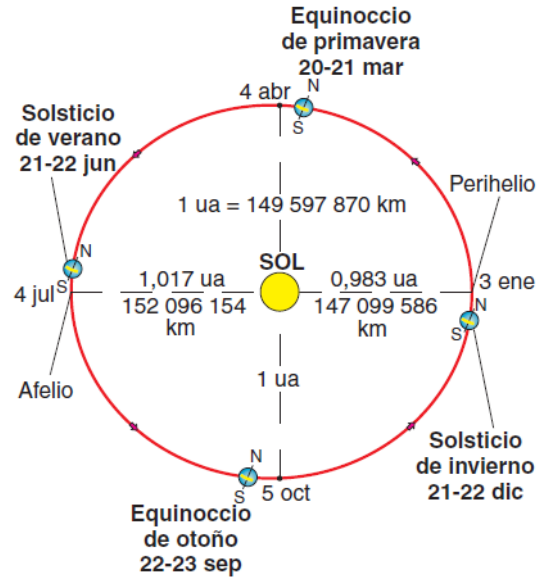
Sin embargo la energía disponible de manera natural resulta insuficiente para las necesidades energéticas actuales, por lo que se han desarrollado tecnologías de aprovechamiento directo de la energía proveniente del Sol:

- Energía solar térmica.- Se aprovecha el calor generado por la radiación solar para el calentamiento de superficies, líquidos o gases y su aplicación en bombas de calor.
- Energía solar fotovoltaica.- Se transforma la luz solar directamente en energía eléctrica.

La energía solar fotovoltaica presenta el beneficio de que se consigue energía eléctrica directamente sin necesidad de aditamentos adicionales como en la solar térmica, por lo que se hace más interesante su desarrollo en la actualidad donde la mayor parte de los dispositivos funcionan con energía eléctrica.

## **1.2. Movimientos de la Tierra.**

La Tierra tiene un movimiento de traslación alrededor del Sol, en sentido contrario a las agujas del reloj si se observa desde el hemisferio norte, describiendo una órbita ligeramente elíptica con el Sol situado en uno de los focos de la elipse y no en el centro de la misma. Esto provoca que la distancia del Sol a la Tierra no sea constante (figura 1.2).

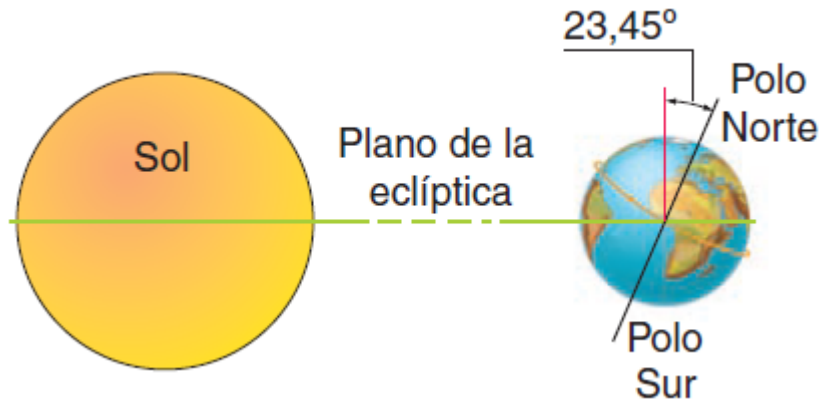


**Figura 1.2 Movimiento de traslación de la tierra.**

La distancia media entre la Tierra y el Sol es de aproximadamente 149 597 870 km y se utiliza para definir la unidad de distancia denominada unidad astronómica (ua). El punto más alejado de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (1,017 ua) se llama afelio, se produce en torno al 4 de julio. El punto más cercano de la órbita (0,983 ua) se llama perihelio, se produce en torno al 3 de enero. Se puede ver que la excentricidad de la elipse es tan pequeña que prácticamente parece una circunferencia. Llamamos año al tiempo que tarda la Tierra en recorrer la órbita descrita, invirtiendo en cada ciclo de traslación 365 días, 5 horas, 48 minutos y 46 segundos, con pequeñas variaciones de un año a otro. La Tierra gira sobre sí misma rotando alrededor del eje que pasa por los polos, denominado eje polar, con una velocidad aproximada de una vuelta por día. Un día dura 23 horas, 56 minutos y 4 segundos, aproximadamente. El sentido de rotación de la Tierra es de Oeste a Este como se deduce del hecho de que el Sol sale por el Este y se pone por el Oeste. El eje polar de la Tierra no es perpendicular al plano de su órbita alrededor del Sol, sino que forma un ángulo de 23,45 grados con la perpendicular a dicho plano. Este plano se denomina plano de la eclíptica (figura 1.3) porque sobre este plano teórico, donde se sitúan las órbitas de la mayoría de los planetas y satélites del Sistema Solar, se producen los eclipses. Esta inclinación del eje



polar provoca los cambios estacionales, las diferentes duraciones de las noches y los días en verano y en invierno, y también la que hace que el Sol esté más alto al mediodía, en verano que en invierno.



**Figura 1.3 Eje polar y plano de la eclíptica.**

Mediante las coordenadas geográficas, latitud y longitud (figura 1.4) podemos definir con precisión una posición cualquiera de la superficie terrestre. Se expresan en grados sexagesimales y se dan con referencia al ecuador y al meridiano de Greenwich. El ecuador es la circunferencia definida sobre la superficie terrestre por un plano perpendicular al eje de rotación de la Tierra que la divide en dos partes, el hemisferio norte y el hemisferio sur. El meridiano de Greenwich es la semicircunferencia imaginaria que une los polos y pasa por Greenwich (distrito de Londres donde estaba el Greenwich Royal Observatory). Las circunferencias definidas sobre la superficie terrestre por planos perpendiculares al eje de rotación de la Tierra y por tanto paralelas al ecuador se denominan paralelos. Las semicircunferencias definidas por los círculos máximos de la esfera terrestre que pasan por los polos se denominan meridianos.

### **1.2.1 Latitud ( $\Phi$ ).**

La latitud ( $\phi$ ) es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto (figura 1.4.a). La latitud del ecuador es, por definición, de  $0^\circ$ . Todos los

puntos ubicados sobre el mismo paralelo tienen la misma latitud. Los puntos que se encuentran al norte del ecuador reciben la denominación Norte (N) y los que se encuentran al sur del ecuador reciben la denominación Sur (S). Se mide de 0° a 90° y se define como positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur. Los Polos Norte y Sur tienen latitud 90° N (+90°) y 90° S (−90°) respectivamente.

### 1.2.2 Longitud.

La longitud (figura 1.4.b) es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. El meridiano de Greenwich divide a la Tierra en dos hemisferios llamados Este (oriental) y Oeste (occidental). Al meridiano de Greenwich, por el ser el meridiano de referencia, le corresponde la longitud cero. También se denomina meridiano cero o meridiano base. La longitud se mide de 0° a 180° y se define como positiva hacia el Oeste (hemisferio occidental) y negativa hacia el Este (hemisferio oriental).

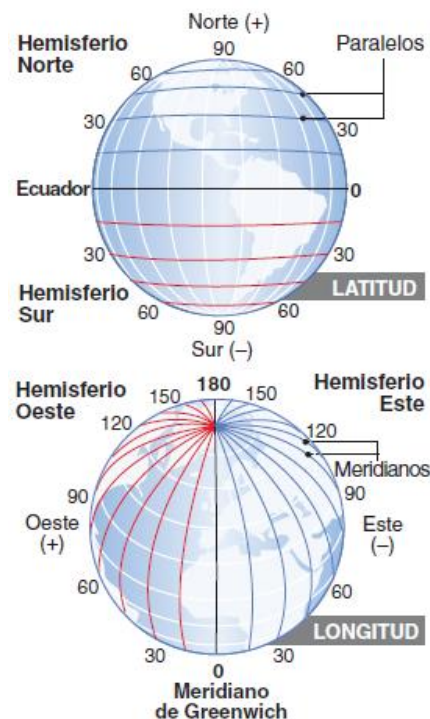


Figura 1.4 a) Latitud y b) Longitud.

### 1.2.3 Declinación.

La declinación ( $\delta$ ) es el ángulo que forma el plano del ecuador de la Tierra con la línea situada en el plano de la eclíptica, que une los centros del Sol y de la Tierra (figura 1.5). Este ángulo varía a lo largo de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, alcanzando valores máximos en los solsticios de verano (declinación máxima positiva,  $\delta = 23,45^\circ$ ) e invierno (declinación máxima negativa,  $\delta = -23,45^\circ$ ) y valores nulos en los equinoccios (declinación nula,  $\delta = 0^\circ$ ). Aunque la declinación varía se puede suponer que permanece constante a lo largo de un día. La expresión de la declinación para un determinado día se calcula con la expresión:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left( 360 \cdot \frac{284 + \delta_n}{365} \right)$$

$\delta$ : declinación (grados)  
 $\delta_n$ : día del año (1...365, tomando 1 para el primer día de enero)



Figura 1.5 Posición de la Tierra respecto del Sol en el solsticio de invierno.

### 1.3. Sistema Fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica es la energía procedente del Sol que se convierte en energía eléctrica de forma directa, sin ninguna conversión intermedia. Se produce mediante generadores fotovoltaicos compuestos por módulos fotovoltaicos conectados entre sí que su vez están compuestos por unidades básicas

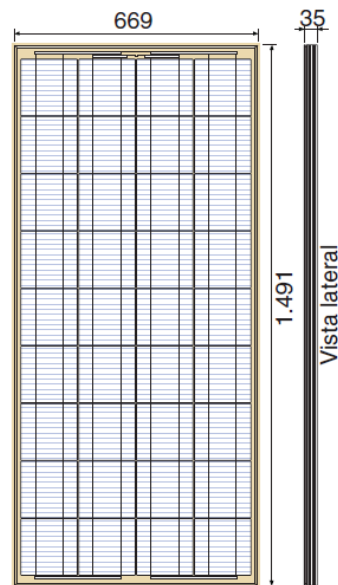
denominadas celdas solares o fotovoltaicas. El conjunto de módulos fotovoltaicos que componen un generador forma una superficie plana que tiene que ser expuesta a la luz del Sol para producir energía eléctrica. La inclinación y la orientación adecuadas de dicha superficie son fundamentales para conseguir una conversión eficiente de energía solar en energía eléctrica. Para conseguir este objetivo es necesario conocer un conjunto de conceptos básicos y la terminología utilizada para describir el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, definir una posición sobre la superficie de la Tierra y cuantificar la cantidad de energía solar recibida en una superficie situada en un lugar determinado.

La energía proveniente del Sol que un objeto en la Tierra puede aprovechar es variable y difícil de prever de manera exacta ya que es afectada por factores ambientales y la fuente de energía se encuentra en un movimiento relativo constante, por lo que es conveniente la adición de elementos para su mejor aprovechamiento, un sistema fotovoltaico básico consta de la transformación de la energía solar en eléctrica, un sistema de almacenamiento para lograr un abastecimiento constante y finalmente el aprovechamiento de la energía producida.

### **1.3.1. Módulos fotovoltaicos.**

Los encargados de transformar la energía solar en energía eléctrica son los módulos formados por celdas fotovoltaicas. Una celda solar típica con una superficie de  $100 \text{ cm}^2$  produce  $1,5 \text{ W}$  aproximadamente, con una tensión de  $0,5 \text{ V}$  y una corriente de  $3 \text{ A}$ . Estos valores de tensión y corriente no son adecuados para casi ninguna aplicación y es necesario agrupar varias celdas para conseguir niveles de tensión y corriente útiles. La mayoría de los módulos fotovoltaicos tienen entre 36 y 96 celdas conectadas en serie. En algunos casos pueden incluir la conexión en paralelo de grupos de celdas conectadas en serie. Además, hay que proporcionar al conjunto de celdas una protección frente a los agentes atmosféricos, un aislamiento eléctrico adecuado y una consistencia mecánica que

permita su manipulación práctica. Al conjunto de celdas solares agrupadas en las condiciones descritas se le denomina módulo fotovoltaico. Para obtener potencias mayores las celdas son conectadas en serie o en paralelo, formando módulos (con potencias típicas del orden de los 50 a 100 W) y paneles fotovoltaicos (>100W) [Castro, 2004].



**Figura 1.6 Vista frontal y lateral de un módulo fotovoltaico de 130 W, con celdas de silicio policristalino.**

### **Estructura de un Módulos fotovoltaicos.**

Un módulo fotovoltaico (figuras 2.2) está compuesto por:

- **Cubierta frontal.** Suele ser de vidrio templado de entre 3 y 4 mm de espesor, con muy buena transmisión de la radiación solar, proporciona protección contra los agentes atmosféricos y los impactos (granizo, actos vandálicos, etc.). La superficie exterior del vidrio es antirreflexiva y está tratada para impedir la retención del polvo y la suciedad. La superficie interior generalmente es rugosa, lo que permite una buena adherencia con

el encapsulado de las celdas, además de facilitar la penetración de la radiación solar.

- **Encapsulado.** En la mayoría de los módulos se emplea etil-vinil-acetato (EVA). En contacto directo con las celdas, protege las conexiones entre las mismas y aporta resistencia contra vibraciones e impactos. Además proporciona el acoplamiento con la cubierta frontal y la protección posterior. Al igual que la cubierta frontal, permite la transmisión de la radiación solar y no se degrada con la radiación ultravioleta.

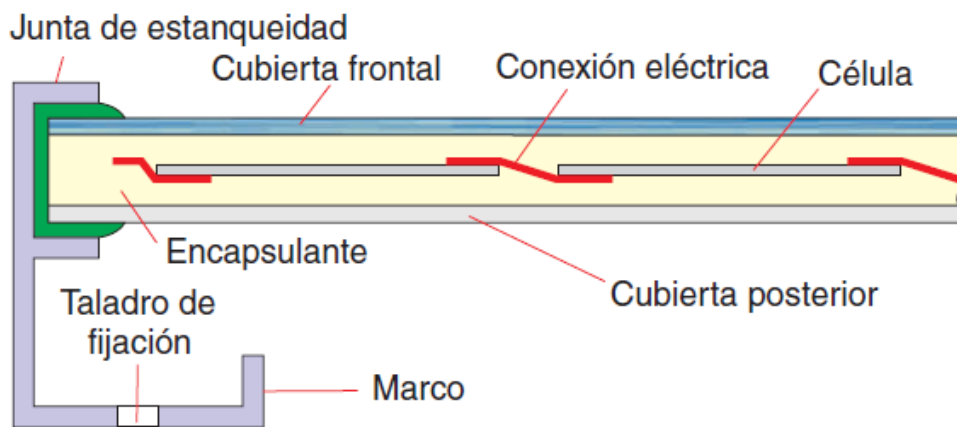
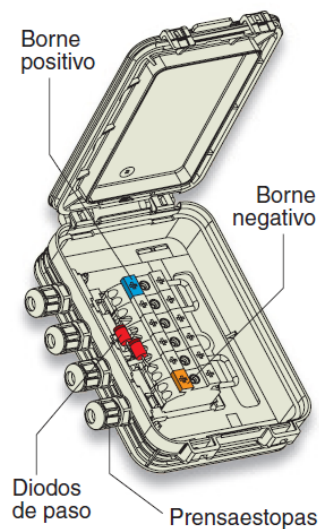


Figura 1.7 Detalle seccionado de la estructura de un módulo fotovoltaico.

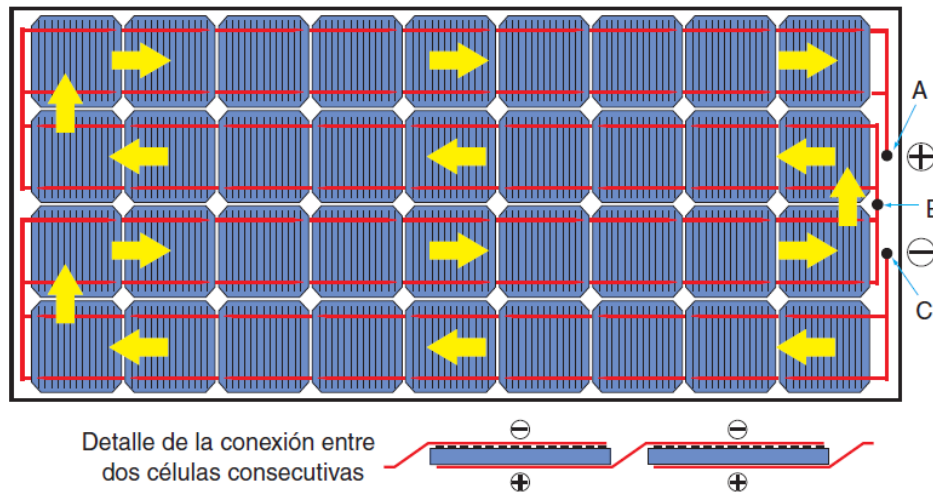
- **Cubierta posterior.** Se utiliza una capa de polivinilo fluoruro (PVF, comercialmente denominado TEDLAR) o de poliéster. Junto con la cubierta frontal, protege al módulo de la humedad y otros agentes atmosféricos y lo aísla eléctricamente. De naturaleza opaca, es habitual que sea de color blanco para reflejar la luz solar que no recogen las celdas sobre la cara posterior rugosa de la cubierta frontal, que la refleja de nuevo hacia las celdas. Algunos fabricantes ponen esta cubierta de vidrio para aprovechar la radiación solar reflejada que puede recogerse por la parte posterior del módulo. Para ello las celdas solares incluyen capas de silicio amorfo que recoge esta radiación.

- **Marco.** La mayoría de los fabricantes utilizan aluminio anodizado. Proporciona rigidez y resistencia mecánica al módulo, además de un sistema de fijación. Puede incorporar una conexión para la toma de tierra. Nunca se debe mecanizar, porque las vibraciones pueden romper el cristal de la cubierta frontal.
- **Conexiones.** Situadas en la parte posterior del módulo, habitualmente consiste en una caja (figura 1.34) con una protección recomendada contra el polvo y el agua IP-65, fabricada con materiales plásticos resistentes a las temperaturas elevadas, que en su interior incorpora los bornes de conexión positivo y negativo del módulo y los diodos de paso (diodos by-pass). El uso de prensaestopas para el paso de cables mantiene la protección contra el polvo y el agua. Otra forma de conexionado se puede ver en la figura 1.35, el fabricante suministra el módulo fotovoltaico con dos cables, finalizados con conectores, diferentes para el positivo y negativo, con la longitud suficiente para permitir una rápida conexión serie entre paneles consecutivos.



**Figura 1.8 Caja de conexiones de un módulo fotovoltaico.**

- **Celda.** El conexionado de las celdas de un módulo fotovoltaico se realiza con cintas metálicas soldadas o incrustadas sobre la rejilla de conexión eléctrica de la cara frontal de cada celda. La interconexión entre celdas (figura 1.36) se realiza uniando las cintas de la cara frontal (negativo) de una celda con la cara posterior (positivo) de la celda siguiente.



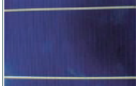
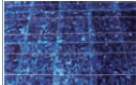

**Figura 1.9 Conexionado de las celdas de un módulo fotovoltaico de silicio monocristalino.**  
**Se indica el sentido de circulación de la corriente.**

La figura 1.3 muestra el conexionado de un módulo de 36 celdas conectadas en serie. El principio y el final de la cadena de celdas en serie finaliza en los puntos A y C que representan los terminales positivo y negativo de la caja de conexiones situada en la parte posterior del módulo. El punto B representa al terminal que permite la conexión de los diodos de paso, también situados en la caja de conexiones figura 1.8.

La característica principal de un módulo fotovoltaico es la eficiencia en la conversión de energía que está determinada por el tipo de material y tecnología utilizada en su fabricación. Actualmente el mayor desarrollo se ha llevado a cabo en las celdas que utilizan el silicio como semiconductor debido a su bajo costo, de



este desarrollo se obtienen tres tipos diferentes de módulos fotovoltaicos actualmente en el mercado (PV-TRAC, 2005), Tabla 1.

Tipo de célula	Eficiencia	Aspecto	Características
Silicio monocristalino	15...18 %		Estructura cristalina uniforme. Se fabrica en lingotes cilindricos de gran pureza que se cortan en obleas. Se gasta mucha energía en su construcción. Es el primer material en utilizarse industrialmente.
Silicio policristalino	12...14 %		Estructura cristalina no uniforme. Se fabrica en moldes rectangulares. Menor coste que el silicio monocristalino.
Silicio amorfo	6...9 %		Estructura no cristalina. Su potencia se degrada con el tiempo de utilización. Se puede depositar como una capa muy fina en muchos tipos de soportes, incluso flexibles. Bajo coste de fabricación.

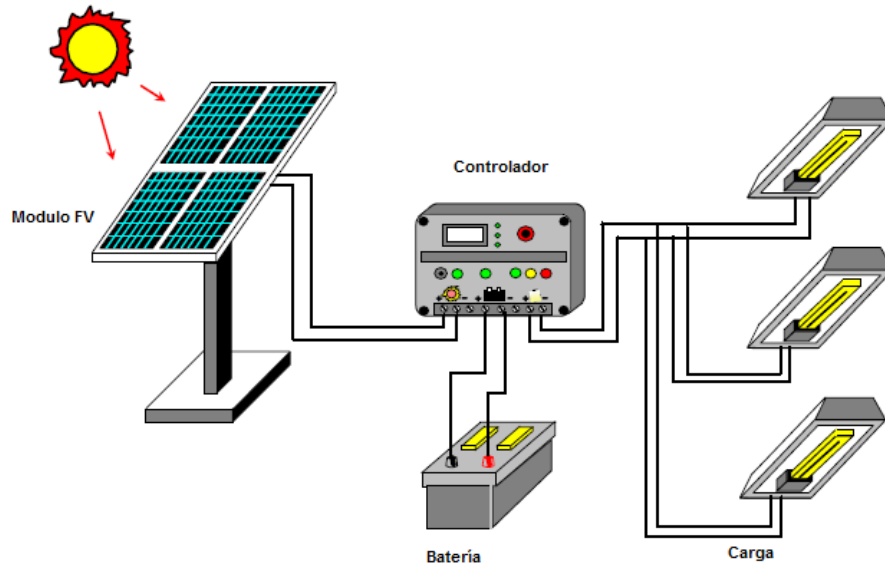
**Tabla 1.-Tipos más utilizados de celdas solares.**

La energía obtenida a través de los módulos fotovoltaicos es energía eléctrica de corriente directa que puede ser utilizada de manera directa o bien almacenada para su uso en periodos de menor o nula incidencia de radiación.

### **1.3.2. Almacenamiento de la energía.**

La capacidad de un sistema fotovoltaico de producir y almacenar energía de manera adecuada lo convierte en una fuente de energía confiable y constante aun cuando exista nubosidad, lluvia o sea de noche. La confiabilidad del sistema dependerá de una selección adecuada de los componentes para la producción de energía y su almacenamiento.

En un sistema fotovoltaico la parte de acumulación de energía consta de dos componentes, el regulador de carga de las baterías y las baterías. El regulador de carga es un dispositivo encargado de proteger a la batería frente a sobrecargas y descargas profundas. El regulador de tensión controla constantemente el estado de carga de las baterías y regula la intensidad de carga de las mismas para alargar su vida útil, (Figura 1.10).



**Figura 1.10 Funcionamiento del controlador como regulador de carga.**

También genera alarmas en función del estado de dicha carga. Los reguladores actuales introducen microcontroladores para la correcta gestión de un sistema fotovoltaico. Su programación elaborada permite un control capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especiales. Incluso los hay que memorizan datos que permiten conocer cuál ha sido la evolución de la instalación durante un tiempo determinado. Para ello, consideran los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y capacidad del acumulador. Existen dos tipos de reguladores de carga, los lineales y los conmutados.

La función prioritaria de las baterías en un sistema de generación fotovoltaico es la de acumular la energía que se produce durante las horas de luminosidad para poder ser utilizada en la noche o durante periodos prolongados de mal tiempo. Otra importante función de las baterías es la de proveer una intensidad de corriente superior a la que el dispositivo fotovoltaico puede entregar. Tal es el caso de un motor, que en el momento del arranque puede demandar una corriente de 4 a 6 veces su corriente nominal durante unos pocos segundos.

Existen diferencias entre las baterías automotrices y las baterías utilizadas en sistemas fotovoltaicos, las primeras tienen como objetivo principal el arranque del vehículo, se diseñan para proporcionar valores de corriente altos, aproximadamente 1000 Amperes, por periodos cortos de tiempo con una recarga posterior inmediata durante el funcionamiento del vehículo.

Las baterías para sistemas solares son diseñadas para entregar una potencia constante por periodos largos de operación sin recarga, determinan su calidad por la cantidad de energía que son capaces de acumular y la profundidad de descarga, o mejor dicho el porcentaje de energía del total que es capaz de entregar de manera cíclica sin ocasionar daños a la batería, cercano al 80%, por lo que son denominadas baterías de ciclo profundo (Chavez, 2005).

De manera comercial las baterías para sistemas solares tienen un valor promedio de corriente máxima de 250 Ah, lo que significa que podrán mantener un periodo de descarga de 20 horas a su voltaje nominal (12 V) proporcionando 12.5 A (250 Ah / 20 h) y tener al final el 20% de su carga total aun en reserva. Mientras que las baterías de mejor calidad para automóvil proporcionan 60 Ah (Markvart, 2000).

La diferencia en requerimientos hacia cada batería genera características diferentes en su fabricación. En las baterías automotrices lo importante es tener una baja densidad de corriente (A/cm<sup>2</sup>) para minimizar la caída de voltaje en el arranque del automóvil, por ello se usan placas de plomo esponjoso en su construcción, en las baterías solares se necesita una mayor cantidad de material activo (plomo) para alargar su vida útil lo que las vuelve más pesadas y costosas.

### **1.3.3 Convertidores CD-CD e inversores.**

Su función es convertir la CC de la instalación fotovoltaica en CA para la alimentación de los receptores que trabajan con CA (la mayoría).

Dispositivos electrónicos que convierten la corriente continua en alterna y permiten por tanto:

- Utilizar receptores de CA en instalaciones aisladas de la red.
- Conectar los sistemas FV a la red de distribución eléctrica.

Se pueden distinguir entre:

Inversores de conmutación natural. También son conocidos como inversores conmutados por la red, por ser esta la que determina el fin del estado de conducción en los dispositivos electrónicos. Su aplicación es para sistemas FV conectados a la red. Actualmente están siendo desplazados por los inversores de conmutación forzada tipo PWM, conforme se desarrollan los transistores de tipo IGBT para mayores niveles de tensión y corriente.

Inversores de conmutación forzada o autoconmutados. Son para sistemas FV aislados. Permiten generar CA mediante conmutación forzada, que se refiere a la apertura y cierre forzados por el sistema de control. Pueden ser de salida escalonada (onda cuadrada) o de modulación por anchura de pulsos (PWM), con los que se pueden conseguir salidas prácticamente senoidales y por tanto con poco contenido de armónicos.

Con los inversores tipo PWM se consiguen rendimientos por encima del 90%, incluso con bajos niveles de carga. Cuando un sistema fotovoltaico es conectado a la red eléctrica no es necesario el uso de las baterías ni el controlador de carga [Sick, 1996].

#### **1.3.4 Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos.**

La eficiencia de un sistema fotovoltaico depende de la eficiencia de sus componentes, la Figura 5 nos muestra la mejor eficiencia de los componentes del sistema actualmente (Sandia, 2007).

Con la adición de cada componente se presentan más pérdidas, por lo que un sistema conectado a la red será más eficiente que un sistema aislado que cuente con almacenamiento de energía.

Se observa que el componente más crítico son los paneles fotovoltaicos, con una eficiencia muy baja y afectada por las condiciones de operación. Se desea entonces que las condiciones de operación sean las óptimas, puesto que no es posible actuar sobre las condiciones climáticas queda la opción de corregir la orientación de los paneles con respecto al Sol, tendencia que se conserva en los nuevos desarrollos donde se ha obtenido en laboratorio una eficiencia de 42.8% (VHESC, 2007) pero con la utilización necesaria de un seguidor solar.

Las baterías presentan una buena eficiencia pero tienen el inconveniente de ser pesadas y voluminosas, características que se vuelven críticas si la energía producida se utiliza en aplicaciones móviles, por lo que se están desarrollando nuevas formas de almacenar y transportar la energía producida por sistemas solares, como producción de energía química obteniendo hidrógeno por electrólisis directamente de un sistema solar (Rzayeva, 2007).

#### **1.4. Invernaderos Inteligentes.**

Hace muchos años la situación medio ambiental del planeta ha estado en consideración de varios proyectos. El crecimiento de la población es un hecho que parece llevarnos irremediablemente a un incremento en las demandas de alimentos. El crecimiento solo es sostenible si somos capaces de aumentar en un

gran porcentaje la producción de alimentos. La demanda ejercerá una mayor presión sobre los recursos hídricos y sólo puede considerarse sostenible si somos capaces de incrementar su eficiencia en el uso de los actuales sistemas productivos. Es imperante la producción con calidad y altos rendimientos, donde se hace necesario la utilización de técnicas que nos permitan un ahorro importante de agua, mano de obra y fertilizantes.

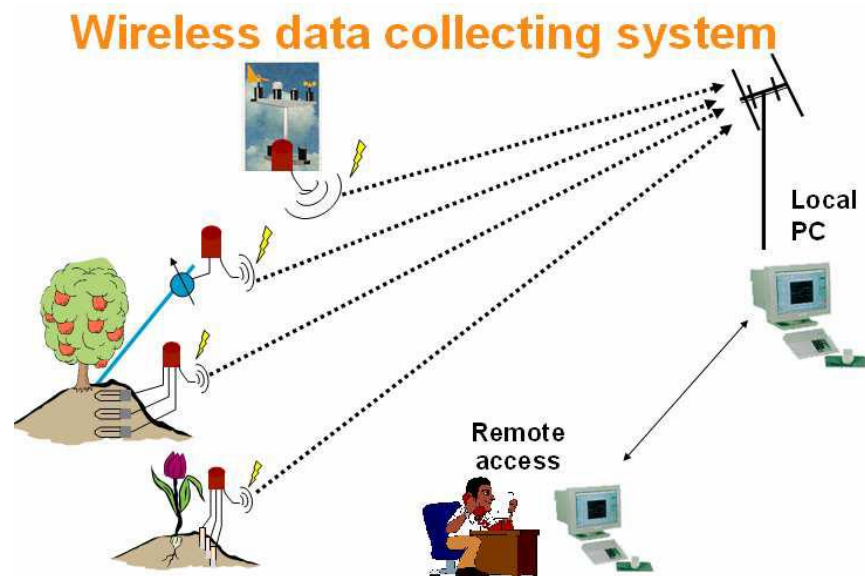
La globalización ha producido la búsqueda de estrategias que requieran el aumento en la producción de los sistemas tradicionales agrícola respetando el medio ambiente. Un punto importante que se debe de tomar en cuenta, es la necesidad de reducir el consumo de agua, ya que en la región Norte y central de México existe un severo déficit hídrico prácticamente en todas las cuencas hidrológicas. Este déficit ha resultado de la sobre-explotación de los mantos acuíferos a niveles excesivos, principalmente para su uso en la agricultura. Esta situación pone en grave riesgo el entorno económico, social y ecológico de esta amplia e importante región del país.

Es así como los cultivos bajo invernadero son una alternativa viable que se ha extendido en todo el mundo, donde el objetivo es proporcionar y mantener un ambiente que conlleve a la producción óptima de un cultivo y que permita producir en condiciones climáticas desfavorables, obteniéndose mayor cantidad y calidad de producción por unidad de superficie. Otro punto de suma importancia es reducir el consumo de agua y de fertilizantes que se utilizan en la producción bajo invernadero.

El sistema de fertirrigación es, hoy por hoy, el método más racional para realizar una fertilización optimizada, respetando el medio ambiente dentro de la denominada agricultura sostenible; esta agricultura sostenible es de vital importancia ya que la sostenibilidad de los recursos hídricos en México requiere una mayor producción agrícola con menos consumo de agua y fertilizantes.

Los actuales sistemas intensivos de producción agrícolas, usan técnicas de riego localizado y el modo peculiar de cultivar en un medio más o menos artificial: suelo natural modificado, suelo artificial, sustrato e incluso cultivo en una solución salina. Estas técnicas alteran las funciones tradicionales del suelo, como reserva de agua y nutrientes, sirviendo, fundamentalmente, en estos casos como soporte del cultivo. Las nuevas tecnologías intentan ofrecer el agua y los nutrientes, en un medio sub-saturado, lo más directamente posible a las plantas, tratando de minimizar las pérdidas por evaporación y lixiviación.

Actualmente se han propuestos una variedad de equipos que también incluyen la administración y el control del riego de diferentes cultivos usando tecnologías de comunicación inalámbricas (Figura 7).



**Figura 1.11 Administración y control de riego.**

Este equipo consta de sensores de humedad del suelo, sensores de flujo para medir la cantidad de agua-fertilizante, sensores de presión, electro válvulas, tensiómetros, sistema de transmisión inalámbrico, software para la administración y el control, entre otros.

## **1.5. Problema.**

Actualmente debido a las exigencias del mercado de exportación, donde México tiene que competir con países más avanzados y el éxito de estos agro-negocios reside en tener una mayor calidad y alta productividad; una opción para nuestro país es tecnificar su producción de hortalizas en invernadero a través del desarrollo de sistemas de control climático más avanzados (Castañeda, R, 2006), incluyendo sistemas fotovoltaicos para energizar estos procesos y tener un sistema autónomo y sustentable, en zonas rurales donde el uso de energía eléctrica convencional no existe o es de muy mala calidad para poder funcionar eficientemente estos sistemas autónomos.

## **1.6. Objetivo General.**

Desarrollar un sistema fotovoltaico de baja potencia, basado en el estudio energético, análisis de mecanismo (seguidor móvil) y control inteligente, para la operación de un invernadero hortícola (control clima, control riego).

## **1.7. Objetivos Específicos.**

- Desarrollar el estudio energético de invernaderos inteligentes, mediante el cálculo y mediciones de las cargas eléctricas que integran el sistema, para determinar el sistema fotovoltaico requerido.
- Diseño y Construcción de un sistema fotovoltaico mediante la integración de celdas fotovoltaicas, banco de baterías, dispositivos eléctricos y electrónicos (tracker móvil), para la generación de energía eléctrica.



## 1.8. Hipótesis.

Un sistema alternativo de generación de energía eléctrica puede ser capaz de suministrar energía durante todo el año sin importar las condiciones climatológicas, para invernaderos en comunidades rurales.

Tareas a Realizar para lograr las Metas del Proyecto:

- Dimensionar e Instalar el sistema fotovoltaico de 1 kW, acoplándolo al sistema instalado o en proceso de instalación en sistemas de baja potencia. Instalando al final de 1 a 1,2 kW de potencia eléctrica utilizando paneles fotovoltaicos.
- Verificar las condiciones de protección al sistema ante condiciones de sobrevoltaje y corriente.
- Dimensionar e Instalar el sistema de almacenamiento de energía basado en un banco de baterías.
- Evaluar las condiciones de operación y seguridad.
- Realizar la instalación electrónica para sensar/controlar/actuar el funcionamiento del sistema fotovoltaico acoplado a un invernadero inteligente.
- Implementar el sistema de inversores para alimentar cargas eléctricas de corriente alterna de hasta 1.5 kW.
- Instrumentar el sistema en línea para sensar, controlar y actuar su funcionamiento, utilizando como carga variable la infraestructura instalada en la zona de plataforma de experimentación en instalaciones de baja potencia.
- Caracterizar el funcionamiento del sistema operando en línea durante un periodo de tiempo determinado, bajo condiciones reales de operación.
- Evaluar el funcionamiento del sistema fotovoltaico para su implementación en una instalación de baja potencia eléctrica en invernaderos inteligentes o sistemas de baja potencia.

- Desarrollo de un algoritmo de Control con lógica difusa, mediante la el control de variables tales como, la irradiación, la potencia, la posición y orientación del tracker móvil con referencia al sol.
- Determinar la eficiencia de un tracker solar con respecto un sistema estatico de celdas fotovoltaicas.

## **1.9. Metodología.**

Para llevar a cabo este proyecto se desarrolla el estudio de disponibilidad del recurso solar en San Juan del Río, Mediante la información detallada de la Latitud y longitud y altura sobre el nivel del mar, así como la radiación global sobre la superficie de la zona de estudio.

Se analiza y se calcula el estudio energético de invernaderos inteligentes, mediante el cálculo y mediciones de las diferentes variables que integran el sistema, Para el estudio energético del invernadero, se consideró un prototipo de 120 m<sup>2</sup>, para una producción aproximada de 30Kg/m<sup>2</sup> de producción de hortalizas (jitomate). Este invernadero inteligente contempla principalmente dos partes principales:

- Sistema de Riego.
- Control Ambiental.

Al obtener el análisis energético del invernadero inteligente y conocer las variables y características eléctricas del sistema, se llevan a cabo los cálculos necesarios para determinar el sistema fotovoltaico propuesto para la generación de energía requerida en la alimentación de todo el sistema.

Posteriormente se lleva a cabo el diseño y construcción de un seguidor solar para mejorar la captación de la energía solar con los paneles fotovoltaicos, mediante un

control del seguimiento del sol y monitoreo del sistema. Además, se utiliza un control con lógica difusa en el seguidor solar, donde se analizan variables como velocidad del viento, potencia, irradiación y posición del seguidor con respecto al sol.

Finalmente se presentan las pruebas y resultados obtenidos de la evaluación del funcionamiento del sistema así como el análisis y conclusiones de las mismas y se plantean ciertas recomendaciones para mejorar el trabajo realizado.

## **CAPÍTULO II.**

### **2. MARCO TEORICO.**

El estudio de la teoría inherente al sistema fotovoltaico y seguidores solares sirve como base de diseño para determinar condiciones iniciales de diseño. El entendimiento de las ecuaciones que describen la generación de energía fotovoltaica permiten determinar de manera numérica un aproximado de la energía que se puede producir con el sistema instalado.

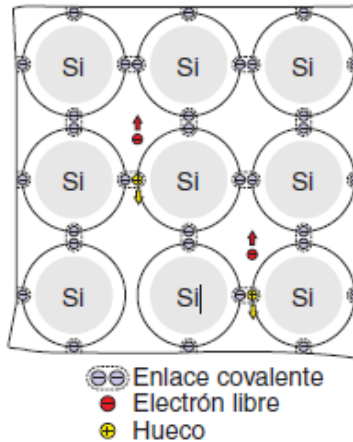
El estudio de las causas del movimiento relativo del sol sirve para comprender su naturaleza, funcionamiento y características para soportar la selección y diseño del seguidor solar y su volumen de trabajo.

La información sobre los seguidores solares comerciales establece un parámetro de partida en el diseño y explora las soluciones actuales a este problema.

#### **2.1. Efecto Fotovoltaico.**

La energía solar fotovoltaica es la energía eléctrica producida por ciertos materiales al exponerlos a la luz solar, la cantidad de energía producida es proporcional al flujo luminoso que reciben. A la transformación de la energía luminosa directamente en energía eléctrica se le conoce como efecto fotovoltaico, fenómeno descubierto por el físico francés Edmund Becquerel en 1839, y sobre el cual está basada la tecnología fotovoltaica.

Las celdas solares se fabrican con semiconductores. Los semiconductores son elementos sólidos que tienen una conductividad eléctrica inferior a la de un conductor metálico pero superior a la de un buen aislante. El semiconductor más utilizado es el silicio. Los átomos de silicio tienen su orbital externo incompleto con solo cuatro electrones denominados electrones de valencia (figura 2.1).



**Figura 2.1 Representación de los enlaces de los átomos del silicio.**

Estos átomos forman una red cristalina en la que cada átomo comparte sus cuatro electrones de valencia con los cuatro átomos vecinos formando enlaces covalentes. Cualquier aporte de energía, como una elevación de la temperatura o la iluminación del semiconductor, provoca que algunos electrones de valencia absorban suficiente energía para librarse del enlace covalente y moverse a través de la red cristalina, convirtiéndose en electrones libres. Cuando un electrón libre abandona el átomo de un cristal de silicio, deja en la red cristalina una vacante (hueco) que con respecto a los electrones circundantes tiene efectos similares a los que provocaría una carga positiva. A las vacantes así producidas se las llama huecos con carga positiva. La energía mínima necesaria para romper un enlace y generar un par electrón-hueco es una cantidad constante, característica del material semiconductor, que se denomina energía de enlace. Para el silicio, la energía necesaria para generar un par electrón-hueco es 1,12 eV.

La luz solar está formada por fotones que se pueden definir como partículas sin masa con una determinada cantidad de energía. Las diferentes energías de los fotones corresponden a las diferentes longitudes de onda que componen el espectro electromagnético solar. El espectro visible se sitúa entre 1,6 y 3,1 eV, a partir de 3,1 eV se encuentra el ultravioleta (UV) y por debajo de 1,6 eV tenemos el infrarrojo (IR).

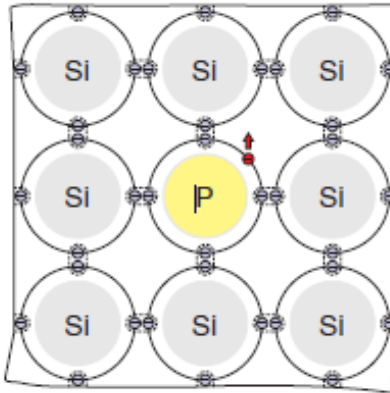
Cuando un fotón incide sobre un semiconductor, si tiene suficiente energía, genera un par electrón-hueco. Si su energía es inferior a la energía de enlace del material, lo atravesará sin producir ningún efecto. Por ejemplo, en el silicio, los fotones con longitudes de onda superiores a 1.100 nm, que tienen una energía inferior a 1,12 eV, no pueden producir pares electrón-hueco. Los electrones y huecos que se generan al iluminar un semiconductor se mueven por su interior aleatoriamente, cada vez que un electrón encuentra un hueco, lo ocupa y libera la energía adquirida previamente en forma de calor, esto se llama recombinación de un par electrón-hueco. Este proceso no tiene ninguna utilidad si no se consigue separar los electrones y los huecos de manera que se agrupen en diferentes zonas para formar un campo eléctrico, de forma que el semiconductor se comporte como un generador eléctrico. Si de alguna forma se consigue mantener esta separación y se mantiene constante la iluminación aparece una diferencia de potencial. Esta conversión de luz en diferencia de potencial recibe el nombre de efecto fotovoltaico. Para conseguir la separación de electrones y huecos se utiliza una unión de semiconductores P y N.

### **2.1.1. Semiconductores P y N.**

Para mejorar la conductividad eléctrica de los semiconductores se utilizan impurezas añadidas voluntariamente, operación denominada dopado, que pueden ser de dos tipos:

- a) Impurezas pentavalentes.** Son elementos cuyos átomos tienen cinco electrones de valencia en su orbital externo. Entre ellos se encuentran el fósforo, el antimonio y el arsénico.
- b) Impurezas trivalentes.** Son elementos cuyos átomos tienen tres electrones de valencia en su orbital externo. Entre ellos se encuentran el boro, el galio y el indio.

Cuando un elemento con cinco electrones de valencia (figura 2.2) entra en la red cristalina del silicio, se completan los cuatro electrones de valencia que se precisan para llegar al equilibrio quedando un quinto electrón libre que se convierte en portador de carga, aumentando su conductividad eléctrica. Un semiconductor dopado con impurezas pentavalentes se dice que es de tipo N por ser negativa la carga de los portadores añadidos.



**Figura 2.2 Silicio con impureza pentavalente (fósforo). Semiconductor tipo N.**

En cambio, si se introduce una impureza trivalente en la red cristalina del silicio (figura 2.3) se forman tres enlaces covalentes con tres átomos de silicio vecinos, quedando un cuarto átomo de silicio con un electrón sin enlazar, provocando un hueco en la red cristalina. Los huecos originados son portadores de carga para el paso de la corriente eléctrica formada por electrones que son transportados de hueco en hueco. El hueco se comporta como una carga positiva que solo se puede mover por el interior del semiconductor. Un semiconductor dopado con impurezas trivalentes se dice que es de tipo P por ser positiva la carga de los portadores añadidos.

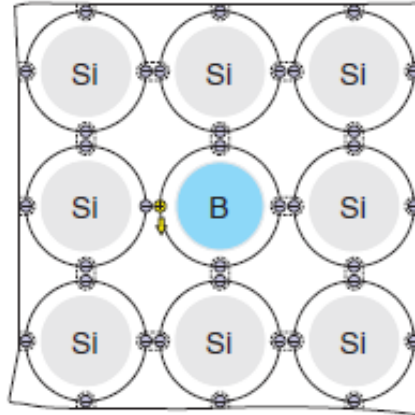


Figura 2.3 Silicio con impureza trivalente (boro). Semiconductor tipo P.

### 2.1.2. Unión PN.

Cuando a un material semiconductor se le añaden impurezas tipo P por un lado e impurezas tipo N por otro, se forma una unión PN con dos regiones, una N y otra P separadas (figura 2.4).

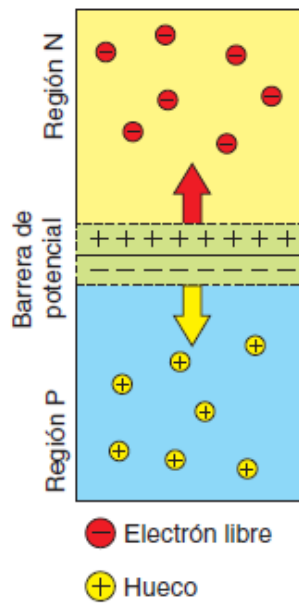


Figura 2.4 Unión PN.

Por la atracción entre cargas positivas y negativas, los electrones libres de la región N más próximos a la región P se difunden en esta, produciéndose la



recombinación con los huecos más próximos de dicha región. En la región N se crean iones positivos y en la región P se crean iones negativos.

Por el hecho de formar parte de una red cristalina, los iones mencionados no se pueden mover y por lo tanto no son libres para recombinarse. Esta distribución de cargas en la unión establece un campo eléctrico o «barrera de potencial » que impide el paso del resto de electrones de la región N a la región P, deteniendo la difusión y manteniendo separados a los portadores de carga de cada región. Una unión PN no conectada a un circuito exterior queda bloqueada y en equilibrio electrónico a temperatura constante [Seeger, 2004].

### 2.1.3. Celda Solar.

Una celda solar básica es una unión PN con un contacto en la región P y otro en la región N que permiten el conexionado con un circuito eléctrico. Si se ilumina la celda, a los electrones y huecos generados los separa la barrera de potencial de la unión PN, acumulando huecos en la región P y electrones en la región N (figura 2.5).

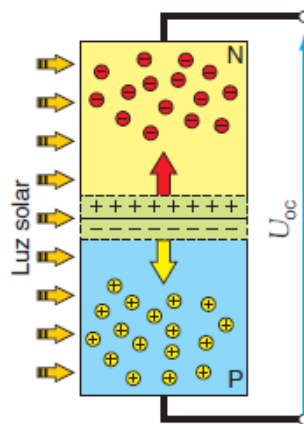
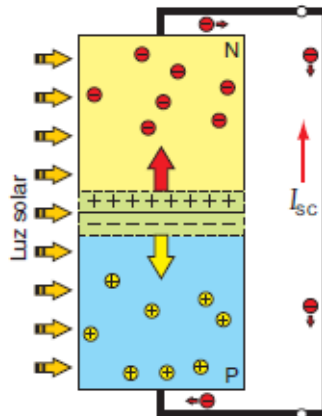


Figura 2.5 Celda solar en circuito abierto.

La acumulación de cargas produce una diferencia de potencial, que aumenta cuando aumenta la iluminación. Esta diferencia de potencial se opone a la generada por la barrera de potencial de la unión PN, empujando a los electrones

hacia la región P y a los huecos hacia la región N, recombinando los pares electrón-hueco generados. Por lo tanto, la acumulación de electrones y huecos tendrá un límite, que dependerá de la dificultad de las cargas para encontrarse de nuevo en el interior del semiconductor. La diferencia de potencial que se alcanza recibe el nombre de tensión de circuito abierto,  $U_{oc}$ . Si cortocircuitamos la celda (figura 2.6) uniendo las regiones P y N con un conductor exterior de resistencia nula, los electrones de la región N se desplazan a través del conductor y se recombinan con los huecos de la zona P. La corriente que circulará por el conductor se mantendrá mientras que esté iluminado, siendo esta corriente proporcional a dicha iluminación. Esta corriente recibe el nombre de corriente de cortocircuito,  $I_{sc}$ .



**Figura 2.6 Celda solar en corto circuito.**

Si se conecta un receptor en el circuito exterior (figura 2.7) la resistencia de dicho receptor condicionará la diferencia de potencial generada por la celda. De las cargas generadas por la iluminación de la unión PN, una parte circulará por el receptor produciendo un trabajo y otra se recombinará en el interior de la celda produciendo calor. La diferencia de potencial en el receptor será el producto de la intensidad producida por la celda, por la resistencia del receptor. Si la resistencia es muy grande, habrá una acumulación mayor de portadores en la unión PN, aumentando la diferencia de potencial sobre la resistencia e incrementando la recombinación de portadores en la celda. Si la resistencia es pequeña, la mayoría

de los portadores circularán por el circuito exterior, reduciendo la acumulación de portadores en la unión PN y disminuyendo la diferencia de potencial sobre la resistencia.

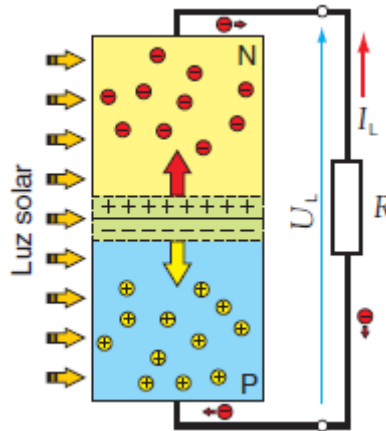


Figura 2.7 Celda solar conectada a un receptor.

Se cumple siempre que la intensidad  $I_L$  y la tensión  $U_L$  en el receptor son inferiores a la intensidad de cortocircuito  $I_{sc}$  y a la tensión de circuito abierto  $U_{oc}$ , respectivamente.

#### 2.1.4. Circuito Equivalente.

Para desarrollar un circuito equivalente de una celda PV, es necesario entender la configuración física de los elementos de la celda y sus características eléctricas. La Figura 2.8, muestra los componentes presentes en una celda PV típica.

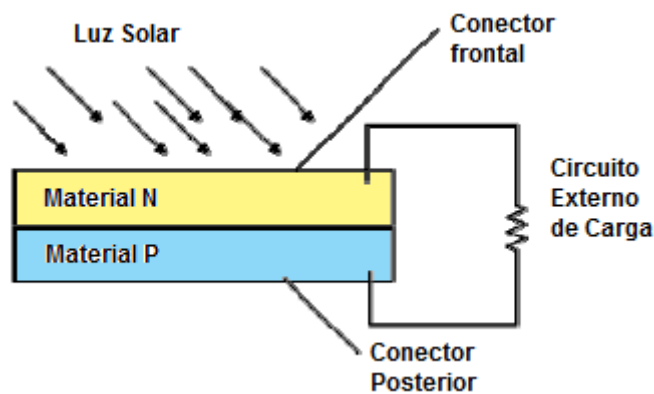


Figura 2.8 Esquemático de la celda PV [Townsend, 1989].

La juntura entre la capa N (red de carga negativa) y P (red de carga positiva) crea el efecto de un diodo. Cuando la celda PV recibe la irradiación solar se obtiene una fuente de corriente constante y las pérdidas eléctricas internas son representadas por una resistencia. El circuito eléctrico equivalente es mostrado en la Figura 2.9.

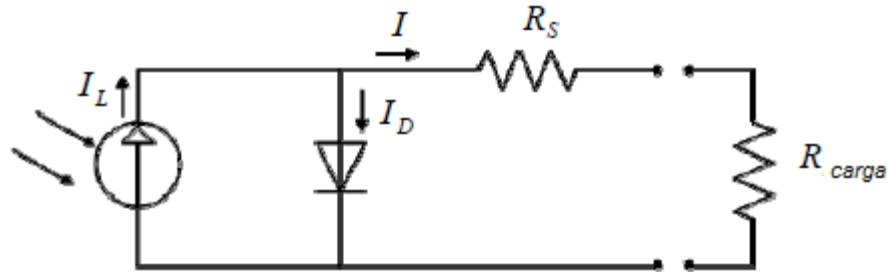


Figura 2.9 Circuito Eléctrico equivalente de la celda PV [Eckstein, 1990].

La fuente de corriente  $I_L$  representa la corriente eléctrica generada debido a la radiación luminosa incidente sobre la superficie activa de la celda (efecto fotovoltaico), la corriente es unidireccional y es función de la radiación incidente, temperatura y voltaje. La juntura P-N es representada por el diodo en paralelo con la fuente de corriente, que es atravesado por una corriente interna unidireccional  $I_D$  que depende de la tensión en las terminales de la celda y la temperatura, la resistencia en serie  $R_S$  representa las pérdidas eléctricas internas en la celda.

Se podría introducir más complejidad al modelo con la adición de una resistencia en paralelo al diodo que represente el efecto de la corriente resistiva a través del cristal. Pero no es posible determinar su valor con los datos proporcionados por el fabricante.

### 2.1.5. Curva Característica $i-u$ .

La figura 2.10 representa las curvas características  $i-u$  y  $p-u$  de una celda solar con irradiancia y temperatura constantes. Sobre la característica  $i-u$  se sitúa el

punto de trabajo de la celda, por ejemplo el punto B, donde la corriente aportada por la celda  $I_L$  y la resistencia  $R$  del receptor, fijan el valor de la tensión  $U_L$ , de acuerdo con la ley de Ohm:

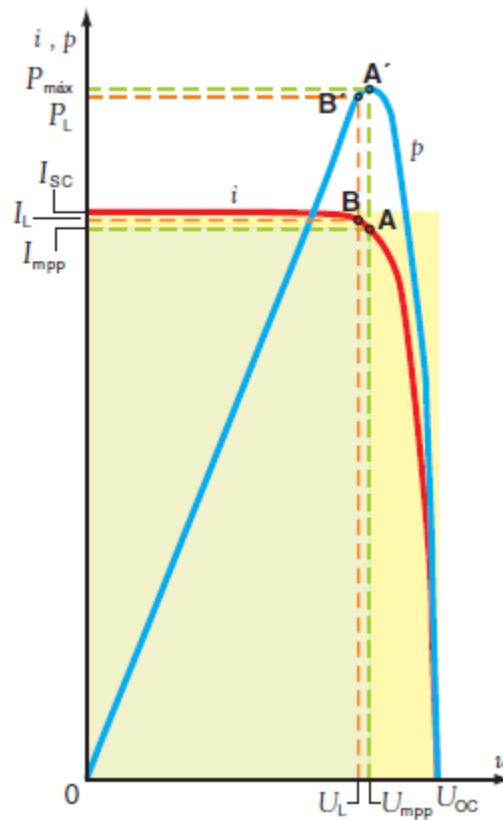
$$U_L = I_L \cdot R \quad (2.1)$$

$R$ : resistencia del receptor ( $\Omega$ ).

$I_L$ : intensidad suministrada por la celda (A).

$U_L$ : tensión en el receptor conectado a la celda (V).

Es importante resaltar que es el valor de esta resistencia  $R$  y el valor de la corriente de la celda  $I_L$  los que imponen el punto de trabajo de dicha celda.



**Figura 2.10** Características  $i$ - $u$  y  $p$ - $u$  de una celda solar.

La potencia  $P_L$  entregada por la celda se representa en la característica  $p-u$  por el punto B' y tiene como valor:

$$PL = U_L \cdot I_L \quad (2.2)$$

$P_L$ : potencia entregada por la celda (W).

$I_L$ : intensidad suministrada por la celda (A).

$U_L$ : tensión en el receptor conectado a la celda (V).

### 2.1.6. Potencia Máxima.

Potencia máxima. Punto de la característica  $i-u$  en el que la potencia entregada por la célula es máxima. Este punto, representado por A en la figura 2.8, tiene su correspondiente punto A' en la característica  $p-u$  de la célula. Se cumple que:

$$P_{m\acute{a}x} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (2.3)$$

$P_{m\acute{a}x}$ : potencia máxima de la célula(W).

$I_{mpp}$ : intensidad máxima de la célula (A).

$U_{mpp}$ : tensión máxima de la célula (V).

Este producto es la potencia máxima que la célula es capaz de suministrar a un receptor, está representado en la figura 8 por el área del rectángulo sombreado con vértice en A y siempre es inferior al área del rectángulo representado por la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  y la tensión de circuito abierto  $U_{oc}$ . El cociente entre ambas áreas se denomina factor de forma ( $FF$ ):

$$FF = \frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{P_{m\acute{a}x}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (2.4)$$

$FF$ : factor de forma, sin unidades.

$P_{m\acute{a}x}$ : potencia máxima (W).

$I_{sc}$ : intensidad de cortocircuito (A).

$U_{oc}$ : tensi3n de circuito abierto (V).

El factor de forma  $FF$  siempre es inferior a la unidad. Es un indicador de la calidad de la célula que será mejor cuanto más cerca est  $FF$  de la unidad.

### 2.1.7. Eficiencia.

También denominada rendimiento de conversi3n,  $\eta$ , indica el porcentaje de energía solar recibida sobre la superficie de la célula que se convierte en energía eléctrica. Se calcula con el cociente entre la potencia eléctrica máxima,  $P_{m\acute{a}x}$ , y el producto del área superficial de la célula,  $A_c$ , por la irradiancia incidente  $G$  en condiciones estándar de medida (CEM):

$$\eta = \frac{P_{m\acute{a}x}}{G \cdot A_c} \cdot 100 \quad (2.5)$$

$\eta$ : eficiencia o rendimiento de conversi3n (%).

$P_{m\acute{a}x}$ : potencia máxima (W).

$G$ : irradiancia en condiciones CEM (1.000 W/m<sup>2</sup>).

$A_c$ : rea superficial de la célula (m<sup>2</sup>).

## 2.2. Seguidor Solar.-

La incidencia de los rayos solares sobre el plano de los paneles fotovoltaicos difiere de la perpendicularidad a lo largo del día y por lo tanto se ve reducida la eficiencia de los paneles solares. Es posible corregir esta situación utilizando un seguidor solar que oriente los paneles a la posición del Sol. El uso de seguidores solares ha reportado ganancias superiores al 20% en estudios de campo [Lorenzo, 2003]. El seguidor solar sigue la trayectoria aparente del Sol ocasionada por los movimientos de la Tierra respecto al Sol.

### 2.2.1. Movimiento de la tierra con respecto al sol.

Para situar la posición del sol en el cielo se utiliza el concepto de esfera celeste, que es una esfera imaginaria de radio arbitrario centrada en el observador, sobre la que se proyecta la posición del Sol (figura 2.11). Cada punto de esta esfera celeste es una dirección en el cielo vista desde la tierra.

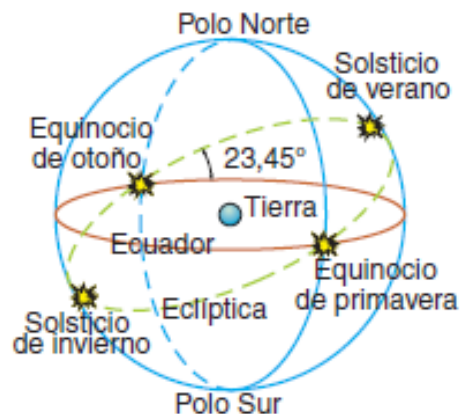


Figura 2.11 Esfera celeste.

Este sistema de representación muestra las posiciones del Sol como si tuviera un movimiento aparente alrededor de la Tierra siguiendo una trayectoria dentro del plano de la eclíptica que forma un ángulo de 23,45 grados con el ecuador de la esfera celeste. El Sol recorre la eclíptica una vez al año y la esfera celeste gira una vez al día en torno a la tierra.



En el sistema de coordenadas de la esfera celeste, que es similar al usado para definir la longitud y latitud terrestres, se especifica la posición del sol mediante dos ángulos que se denominan elevación y acimut (figura 2.12).

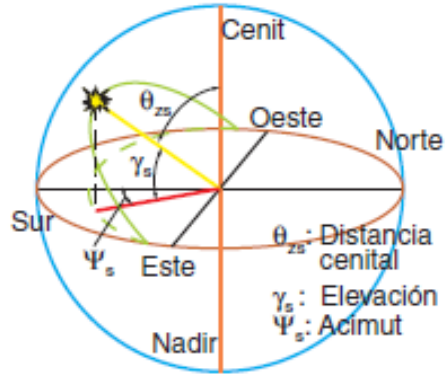


Figura 2.12 Coordenadas solares.

Estas coordenadas solares se definen respecto a la dirección vertical que es la dirección que marcaría una plomada, que apuntando hacia abajo, se dirigiría hacia el centro de la Tierra y hacia arriba interceptaría a la esfera celeste en un punto denominado cenit (figura 1.6). La intersección con el hemisferio opuesto de la esfera celeste definiría el punto opuesto al cenit denominado nadir. Las definiciones de las coordenadas solares son:

- **Elevación solar  $\gamma_s$ :** es el ángulo que forman los rayos solares con la horizontal (figuras 2.12 y 2.13). Toma valores que van de  $(90^\circ - \varphi - \delta)$  en el solsticio de invierno a  $(90^\circ - \varphi + \delta)$  en el solsticio de verano, siendo  $\varphi$  la latitud del lugar y  $\delta$  la declinación.

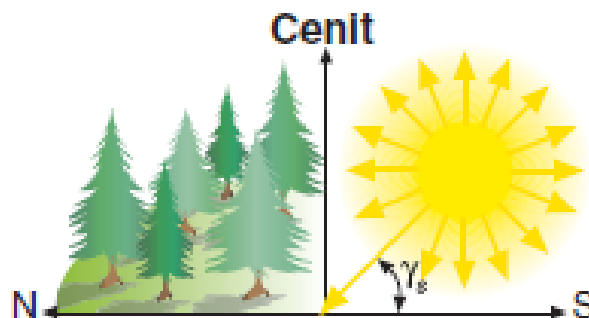


Figura 2.13 Elevación solar.

- **Acimut solar  $\psi_s$** : ángulo formado por el meridiano del sol y el meridiano del lugar, tomando como referencia el Sur en el hemisferio norte y el Norte en el hemisferio sur (figuras 2.12 y 2.14). Tiene valores positivos de 0 a 180° hacia el Oeste y negativos de 0 a -180° hacia el Este.

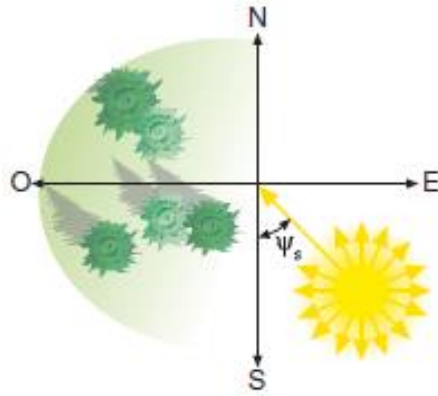


Figura 2.14 Acimut solar.

- **Ángulo o distancia cenital  $\theta_{zs}$** : ángulo formado por la dirección del sol y la vertical. Es el ángulo complementario de la elevación solar (figura 2.12).

La figura 2.15 representa las trayectorias aparentes del sol en los solsticios de verano e invierno y en los equinoccios de primavera y otoño, respecto de un observador que mira al Sur. El resto del año, el Sol sigue trayectorias intermedias entre las representadas. La elevación solar alcanza en los solsticios de verano e invierno sus valores máximo y mínimo, respectivamente.

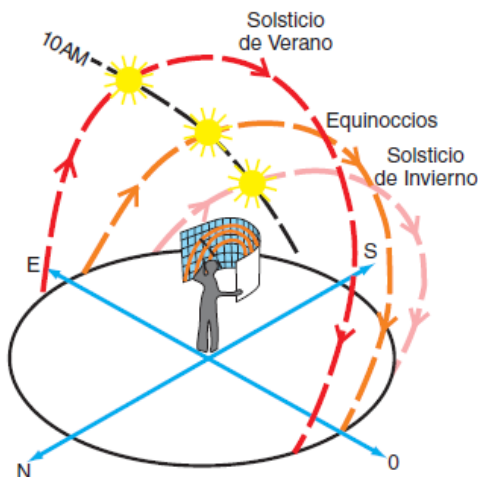


Figura 2.15 Trayectorias aparentes del Sol en el hemisferio norte en los solsticios y equinoccios.

En la figura 2.15 se ha marcado la posición del Sol a una hora determinada (10AM). El observador porta un plano en el que se reflejan las diferentes trayectorias anuales del Sol. Este plano recibe el nombre de carta solar.

El conjunto de trayectorias del Sol en un lugar determinado se puede representar en una carta solar (figura 2.16) que refleja la posición del Sol, acimut y elevación, en cada hora, desde el punto de vista de un observador que mira hacia el Sur (en el hemisferio norte. En el hemisferio sur miraría hacia el Norte). Veamos cómo se interpreta: tomamos la línea que representa a un día, por ejemplo el 21 de marzo, nos situamos en la posición Este, amanece a las 6 de la mañana (6 AM), elevación  $0^\circ$  y acimut  $-90^\circ$ ; a las 11 de la mañana (11 AM), elevación  $50^\circ$ , acimut  $-22^\circ$  aproximadamente; al mediodía (12), elevación  $52^\circ$  aproximadamente, acimut  $0^\circ$ ; a las 3 de la tarde (3 PM), elevación  $32^\circ$  aproximadamente; acimut  $+60^\circ$ .

La carta solar es un instrumento muy útil para determinar las pérdidas por sombras que se producen en un generador fotovoltaico.

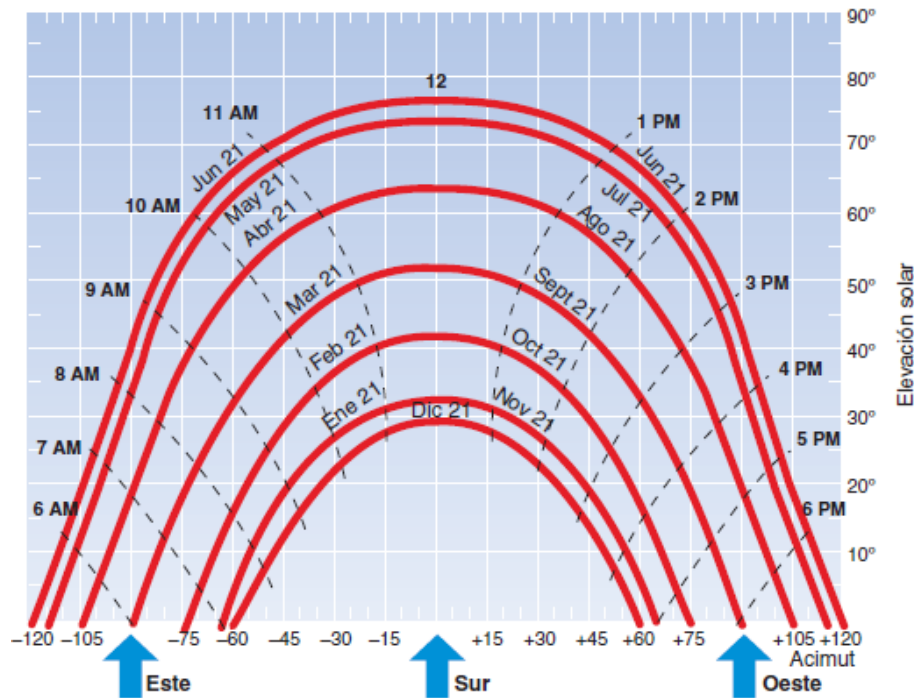
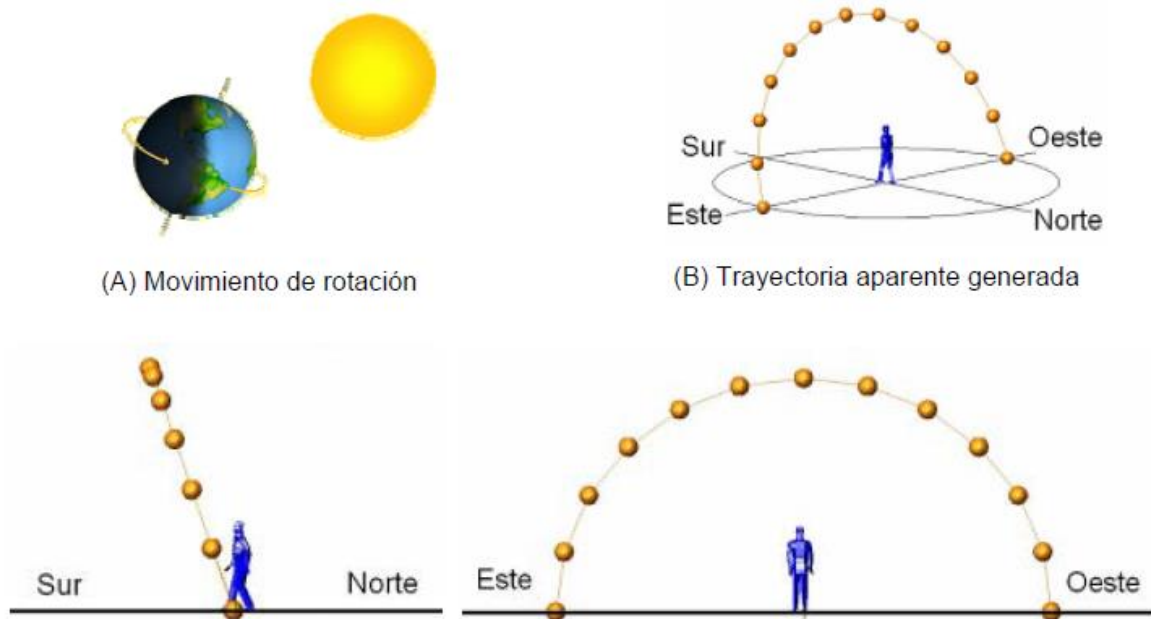


Figura 2.16 Ejemplo de carta solar de un lugar de latitud  $38^\circ$ . Representa las trayectorias aparentes del Sol que veríamos situándonos como el observador de la figura 2.15.

La Tierra realiza dos movimientos que inciden en la posición relativa de un punto en su superficie con respecto al Sol (Dutch, 2004), el movimiento que más afecta esta posición es el de rotación, movimiento que realiza la Tierra sobre su propio eje con una duración de 24 horas 0 minutos y 57.33 segundos, que se ha sintetizado a 24 horas, con la compensación del año bisiesto. Así se da lugar al día y la noche ya que durante el giro la mitad de la Tierra está iluminada y la otra mitad en penumbra.

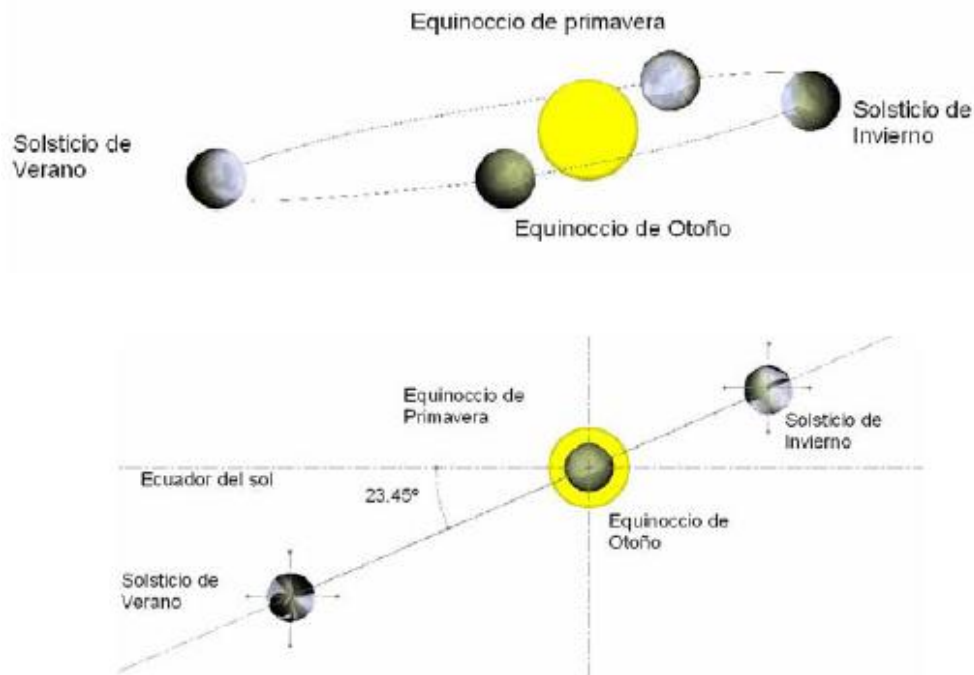


**Figura 2.17.- Movimiento de Rotación de la Tierra.**

El intervalo de tiempo del día y la noche depende de la ubicación geográfica del punto considerado, solo en la línea del Ecuador los días y las noches duran 12 horas durante todo el año. El movimiento de rotación (Figura 2.17), genera que el Sol dibuje una trayectoria circular en el espacio en el periodo que dura el día.

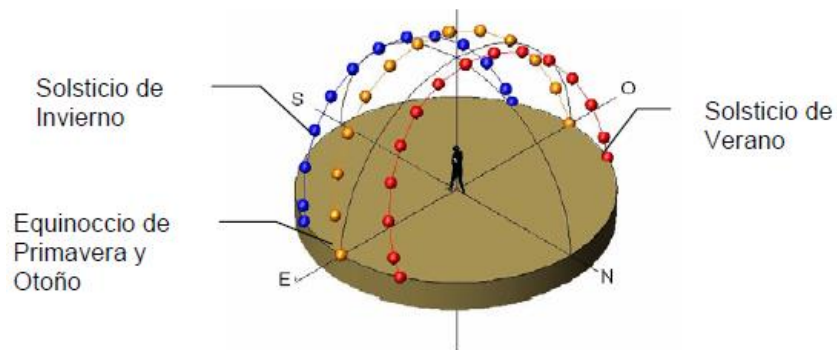
El segundo movimiento que realiza la Tierra es el de traslación que se refiere al movimiento que realiza la Tierra alrededor del Sol. El movimiento de traslación tarda en realizarse 365.2422 días, que para efectos prácticos se toma de 365 y cada cuatro años (año bisiesto) se toma de 366 días. Durante el recorrido la Tierra presenta una trayectoria elíptica alrededor del Sol. La trayectoria elíptica de la

Tierra alrededor del Sol tiene un ángulo con respecto a la horizontal del Ecuador solar de  $23.45^\circ$ , (Figura 2.18).



**Figura 2.18.- Movimiento de Traslación de la Tierra.**

El movimiento de traslación de la Tierra genera que la trayectoria aparente del Sol, ocasionada por el movimiento de rotación, presente una variación a lo largo del año como se muestra en la Figura 2.19, la trayectoria aparente del Sol a lo largo del día varía entonces en su declinación con respecto al observador, esta variación en la declinación incide en la duración del día y la noche. El Sol en su trayectoria pasa siempre por un punto central orientado hacia el sur a las 12 horas del día Solar.



**Figura 2.19 Variación en la declinación por efecto del movimiento de traslación.**

### 2.2.2. Hora Solar.

Un día solar es el tiempo que tarda el Sol en pasar dos veces por el mismo punto, tiene una duración aproximada de 24 horas y siempre a las 12 horas el Sol se encuentra en el meridiano, la aplicación exacta de este tiempo sería poco práctica, por lo que se estandarizó a 24 horas y se crearon los husos horarios para que comunidades cercanas cuenten con el mismo horario, obteniéndose la hora civil, es posible calcular la hora solar a partir de la hora civil con lo que se puede saber la posición exacta del Sol. Para calcular la hora solar es necesario calcular la ecuación del tiempo (Plasencia, 2001):

$$ET = 12 + (0.1236\sin X - 0.0043\cos X) + (0.1583\sin 2X + 0.0608\cos 2X) \quad (2.6)$$

En donde X es el ángulo de desviación de acuerdo al día del año N:

$$X = \frac{360^\circ(N-1)}{365.2422} \quad (2.7)$$

La longitud del tiempo estándar del lugar determinada por:

$$LI = (\text{longitud del lugar} - \text{meridiano de referencia})/15^\circ \quad (2.8)$$

El valor del meridiano de referencia corresponde al del huso horario del lugar donde se desea realizar el cálculo. Para finalmente calcular el tiempo solar (TS):

$$TS = TC - ET - LI \quad (1.26) \quad (2.9)$$

La diferencia en el valor de la hora civil y la hora solar presenta un valor distinto a lo largo del año. La Figura 2.20 nos indica la cantidad de minutos de diferencia de la hora solar con el reloj civil a las 12 horas. El eje de los minutos nos indica la

cantidad de minutos que hay que sumar en el reloj civil para saber cuándo son las 12 horas solares. En esta grafica no se considera el cambio de horario en verano.

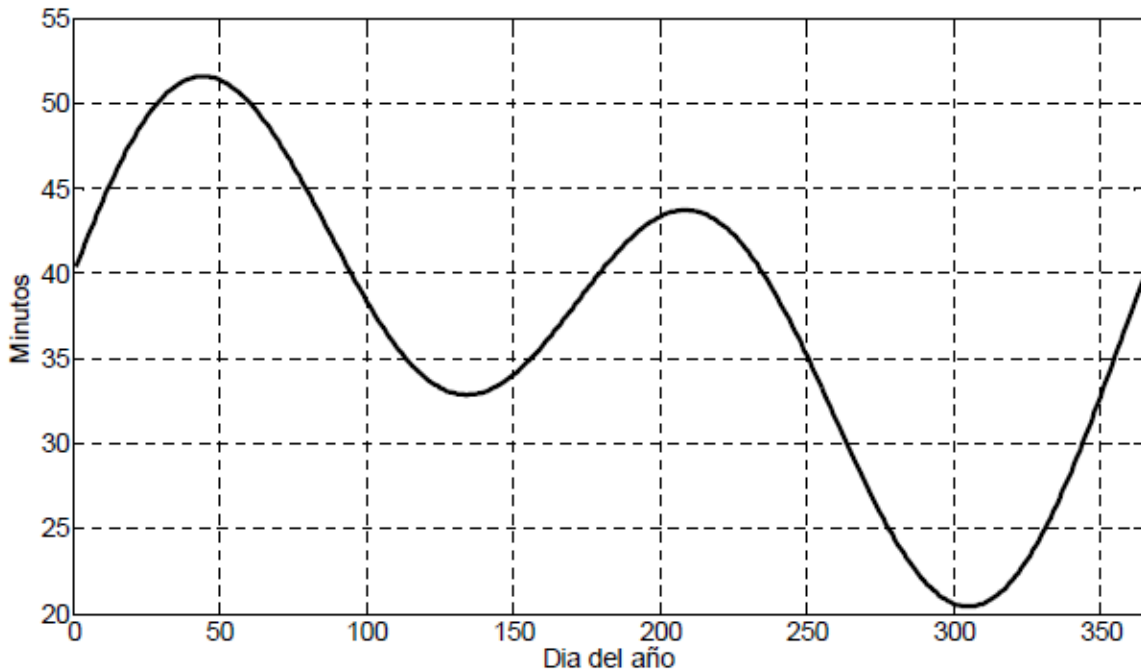


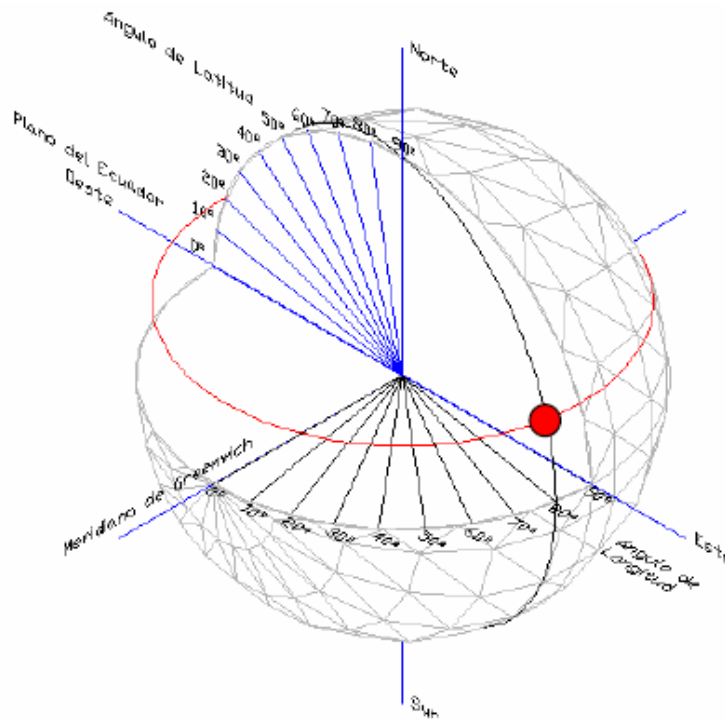
Figura 2.20 Hora Solar.

### 2.2.3. Ubicación de la Trayectoria Solar.

Para poder ubicar la trayectoria solar primero hay que conocer nuestra ubicación en la Tierra. Para localizar un punto en la Tierra se utilizan los ángulos de latitud y longitud propios del lugar, el ángulo de latitud nos dirá que tan retirados estamos del Ecuador y el ángulo de longitud establece la posición de acuerdo al meridiano de Greenwich (plano de referencia internacional para definir el uso horario civil).

Por el ejemplo la Figura 2.21 nos muestra la localización de un punto con coordenadas  $20^{\circ}$  latitud Norte y  $80^{\circ}$  de longitud Este, de esta manera se puede localizar geográficamente cualquier punto en la bóveda terrestre que se requiera, necesario para conocer la ubicación de la trayectoria aparente del Sol.

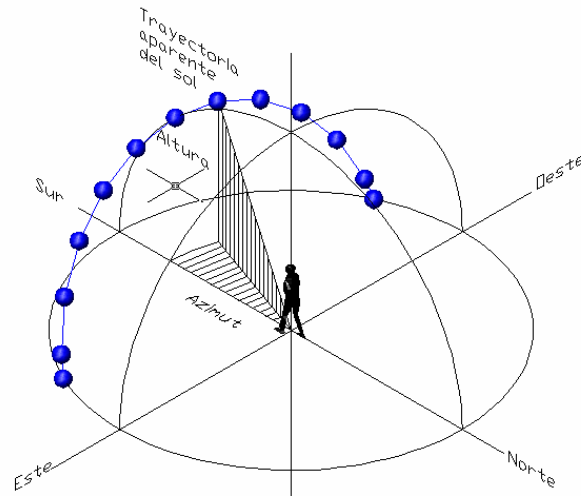
El ángulo de latitud es el que incide en la posición de la trayectoria, ya que el ángulo de longitud, al estar trazado de manera perpendicular al eje de rotación solo nos sirve para establecer el uso horario, por lo que comunidades que se encuentren en el mismo ángulo de latitud observaran la misma trayectoria del Sol, lo que incide en que presenten también un valor de radiación solar muy parecido. Figura 1.1.



**Figura 2.21 Ubicación de un punto en la Tierra.**

Para ubicar la posición del Sol respecto a un punto en la Tierra se hace uso de dos ángulos, el de altura ( $h$ ), que es el ángulo del Sol con respecto al plano horizontal y el de azimut ( $as$ ) que se mide en sentido horario a partir del sur hasta la proyección del Sol en el plano horizontal, (Figura 2.22)





**Figura 2.22 Ubicación del Sol.**

El valor del ángulo de altitud y azimut es una función de la hora, día del año y latitud del lugar que puede ser calculado por métodos numéricos (Plasencia, 2001). En primer lugar se determina el ángulo de declinación de la Tierra ( $d$ ) debida al movimiento de traslación:

$$d = 23.45 \sin \left[ \left( 284 + N \right) \frac{360}{365} \right] \quad (2.10)$$

Donde  $N$  es el día consecutivo del año que se desea conocer. El ángulo horario ( $hs$ ) es el ángulo comprendido entre el meridiano local y la hora de estudio, es decir, es el ángulo que se forma entre el medio día solar y la hora de referencia, que se obtiene por:

$$hs = (12 - \text{hora deseada}) \times 15 \quad (2.11)$$

Con estos datos se obtiene el ángulo de la altura del Sol ( $h$ ):

$$\sin (h) = \cos (L) \cos (d) \cos (hs) + \sin (L) \sin (d) \quad (2.12)$$

Y el ángulo de azimut del Sol ( $as$ ):

$$\sin(as) = \frac{\cos(d) \sin(hs)}{\cos(h)} \quad (2.13)$$

Es necesario aplicar una función inversa cuando el ángulo azimutal es mayor a 90° (cuando la posición del Sol rebasa el eje o plano vertical este-oeste), bajo el siguiente razonamiento:

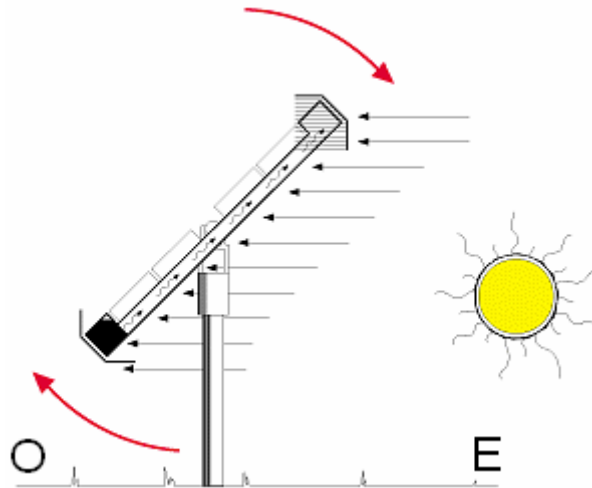
$$\begin{aligned} \cos(hs) < \frac{\tan(d)}{\tan(L)} &\Rightarrow as = \sin^{-1} \left[ \frac{\cos(d) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \\ \cos(hs) < \frac{\tan(d)}{\tan(L)} &\Rightarrow as = 180^\circ - \sin^{-1} \left[ \frac{\cos(d) \sin(hs)}{\cos(h)} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

Ahora que se conoce la trayectoria aparente del Sol, por que se provoca y como se comporta, se pueden analizar los tipos de seguidores solares.

#### 2.2.4. Seguidor Solar Pasivo.

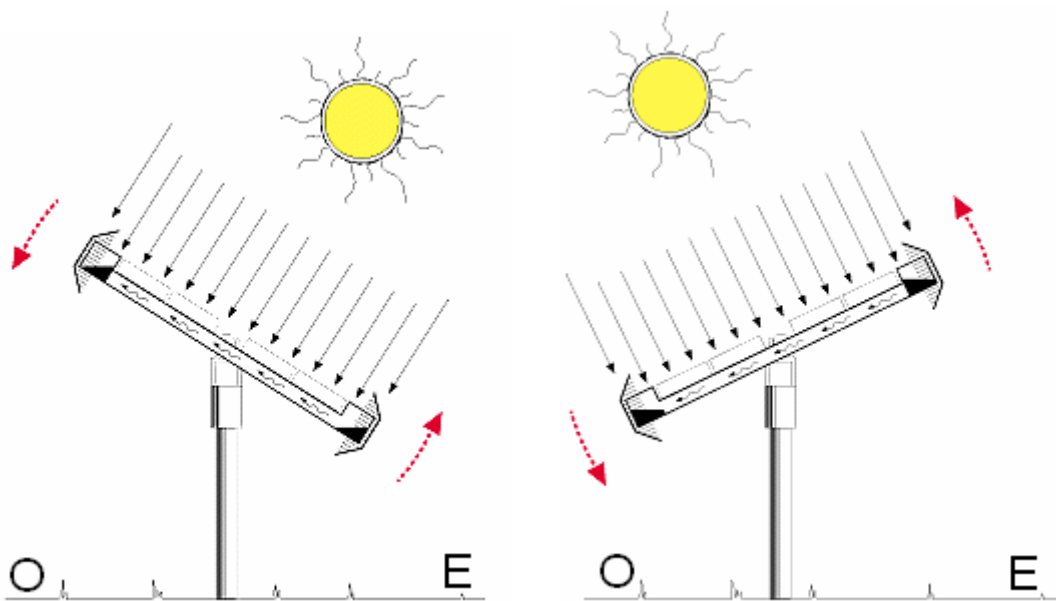
El seguidor solar pasivo es un seguidor de un eje polar que carece de un control electrónico para su funcionamiento, su diseño se basa en el cambio de densidad de un líquido de bajo punto de ebullición, regularmente freón. El líquido se encuentra en dos tanques alineados de este a oeste e interconectados entre sí. Cuando recibe los rayos solares el líquido contenido se evapora y la diferencia de pesos provoca el movimiento, los paneles se colocan de manera tal que se encuentra balanceado el peso y adicionalmente se colocan amortiguadores hidráulicos para contrarrestar la fuerza del viento (Zomeworks, 2007).

El seguidor comienza el día orientado al oeste. Con los primeros rayos solares el freón contenido en el depósito del lado oeste se evapora (Figura 2.23), y circula hacia el contenedor del lado este, al llegar ahí se vuelve a condensar y la diferencia de pesos provoca que el seguidor gire y quede orientado hacia el este.



**Figura 2.23 Seguidor Pasivo, primera etapa.**

Los contenedores cuentan en los extremos con unas placas que originan sombra sobre ellos, el freón contenido en la sombra se condensa y el que está expuesto al Sol se evapora, el equilibrio se alcanza cuando en ambos contenedores, este y oeste, se encuentra una cantidad igual de líquido, y eso se da cuando el plano del seguidor se encuentra perpendicular al Sol. El líquido en los contenedores busca el equilibrio a lo largo del día, lo que induce el seguimiento del Sol, (Figura 2.24).



**Figura 2.24 Seguidor Pasivo, segunda etapa.**

Finalmente, cuando el seguidor llega a su límite mecánico, en el atardecer, los rayos solares inciden solamente sobre el contenedor este y el contenedor oeste se encuentra en la sombra, por lo que se llena de líquido y el seguidor solar se orienta hacia el oeste, finalizando su ciclo de trabajo, (Figura 2.25).

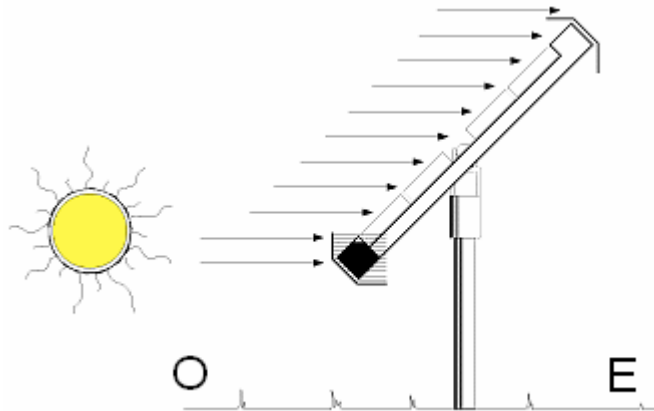


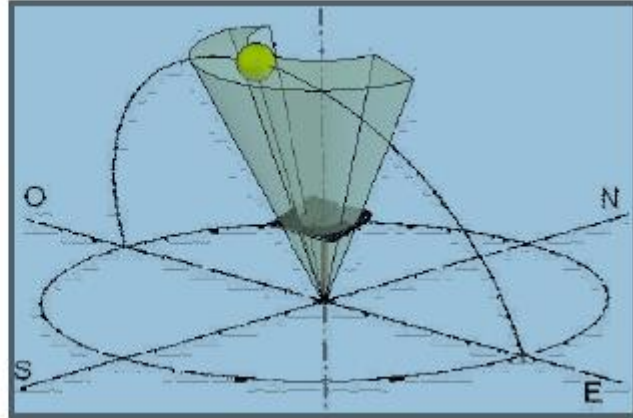
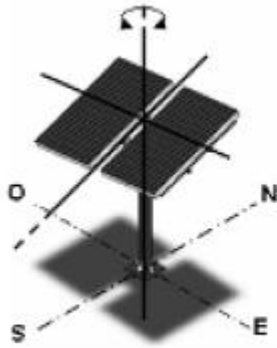
Figura 2.25 Seguidor Pasivo, tercera etapa.

### 2.2.5. Seguidor Solar Activos.

Este tipo de seguidores utiliza un control electrónico para ubicar la posición del Sol, este control se retroalimenta a base de sensores o por cálculos numéricos como los expuestos anteriormente y utilizan algún actuador para realizar el movimiento del seguidor [Pastrana, 2006]. En el mercado existen diferentes tipos de seguidores activos que se diferencian entre sí por el número de movimientos automáticos que realizan y el volumen de trabajo que pueden desarrollar (IEC, 2007).

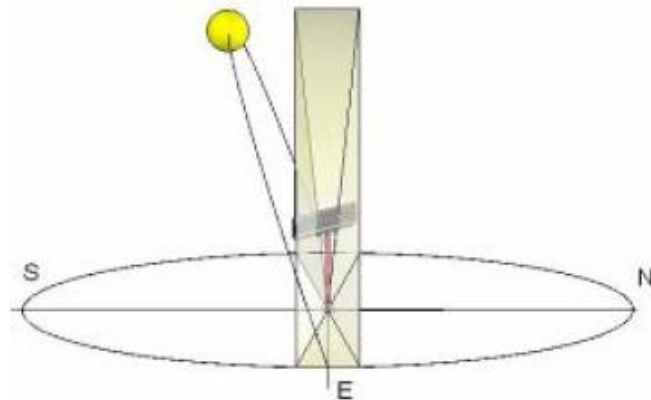
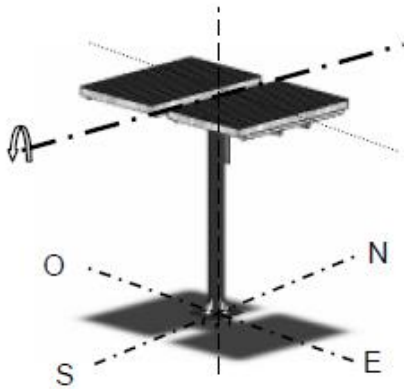
Seguidor solar de un eje, azimutal.- El seguidor solar azimutal gira sobre un eje vertical y la superficie de los módulos tiene una inclinación igual a la latitud del lugar para obtener un mejor rendimiento a lo largo del año. El movimiento es determinado directamente por el valor del ángulo de azimut del Sol. La curva que dibuja en el espacio presenta siempre la misma altitud con un volumen de trabajo

reducido en comparación con los otros seguidores (Figura 2.26), su diseño suele ser el más simple por lo que su uso se ha extendido entre los fabricantes.



**Figura 2.26 Seguidor solar de un eje azimutal.**

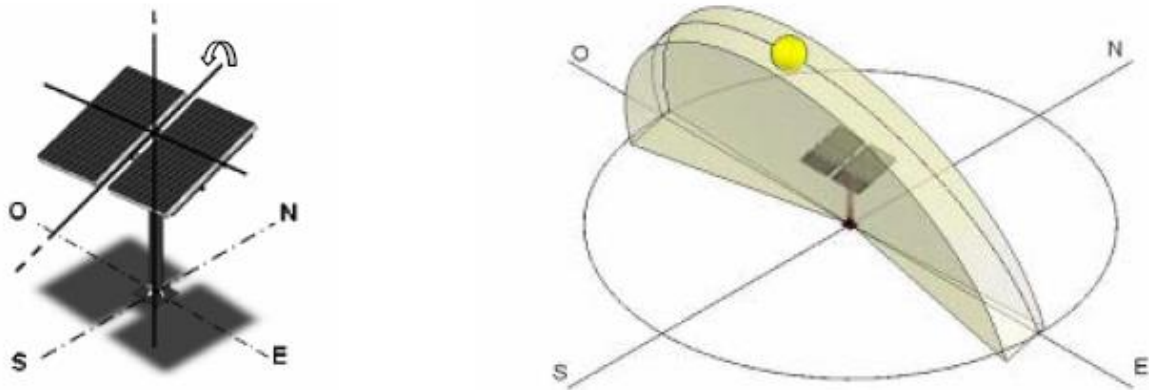
Seguidor solar de un eje, horizontal.- El seguidor solar gira sobre un eje horizontal norte-sur, los módulos son colocados de manera paralela al eje de giro. La trayectoria dibujada es siempre un arco de este a oeste perpendicular al plano horizontal, que difiere de la trayectoria solar en la inclinación que tiene, (Figura 2.27).



**Figura 2.27 Seguidor solar de un eje horizontal.**

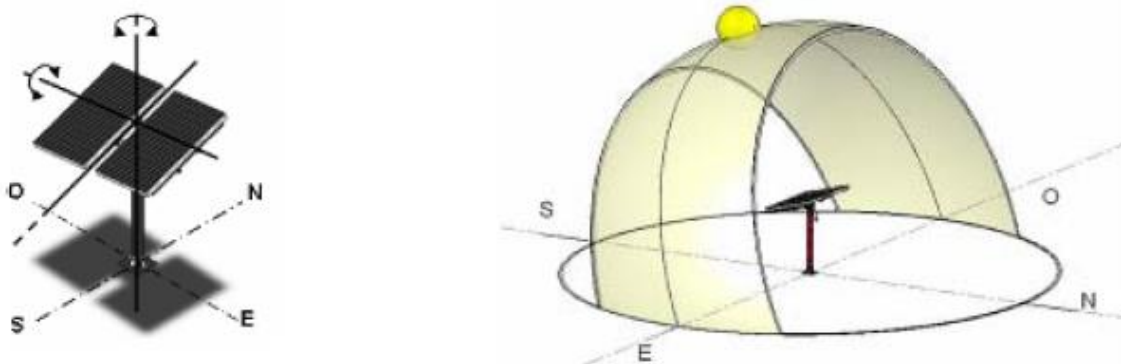
Seguidor solar de un eje, polar.- El seguidor solar gira sobre un eje orientado en dirección norte-sur y con una inclinación del eje igual a la latitud del lugar, los módulos se colocan paralelos al eje de giro, la velocidad de giro es de

aproximadamente  $15^\circ$  por hora. Muy parecido al seguidor horizontal pero su inclinación provee una mejor ganancia por año con respecto a éste ya que corrige la declinación de la trayectoria coincide con la del Sol, en contra se tiene un diseño más elaborado. La inclinación de los módulos opcionalmente puede ajustarse manualmente aun con este ajuste la trayectoria descrita solo coincide fielmente con la del Sol en el equinoccio de primavera y otoño, (Figura 2.28).



**Figura 2.28 Seguidor solar de un eje polar.**

Seguidor solar de dos ejes.- El seguidor solar de dos ejes realiza dos movimientos automatizados para realizar el seguimiento en los dos ángulos que determinan la posición del Sol. Son los únicos en que la superficie de los módulos siempre es perpendicular al Sol todo el día durante todo el año, su volumen de trabajo se extiende a lo largo de la trayectoria del Sol en todo el año, (Figura 2.29).



**Figura 2.29 Seguidor solar de dos ejes.**

### **2.3. Control Difuso.-**

A la mayoría de los sistemas basados en el conocimiento que se utilizan en problemas de control se les aplica la siguiente definición: "Los sistemas basados en el conocimiento (KBS, knowledge based systems) aplicados a problemas de control, son sistemas de control que mejoran el desempeño, confiabilidad y robustez de un control, incorporando conocimientos que no pueden ser incluidos en el modelo analítico sobre el cual el diseño de los algoritmos de control están basados. Estos conocimientos generalmente son tomados de los modos manuales de operación ó por otros mecanismos lógicos más seguros" (Driankov, 1996).

Según menciona Zadeh (1988) en su planteamiento de la lógica difusa. "La lógica, según el diccionario Webster, es la ciencia de los principios formales normativos del razonamiento. En este sentido, la lógica difusa trata con principios formales para aproximar el razonamiento, considerando el razonamiento como una limitante." En términos más específicos el punto central de la lógica difusa es, a diferencia de los sistemas lógicos clásicos, dirigida a modelar los modos imprecisos del razonamiento los cuales juegan un papel importante en la habilidad humana para tomar decisiones racionales en medio de incertidumbres e imprecisión. Esta habilidad depende, de la habilidad del ser humano para inferir una respuesta aproximada a una pregunta, basándose, en el conocimiento acumulado que es inexacto, incompleto ó no totalmente confiable.

Hay dos principales razones por las cuales los sistemas lógicos clásicos no pueden resolver problemas de este tipo. No proporcionan un sistema para representar el significado de las proposiciones expresadas en lenguaje natural cuando el significado es impreciso. Cuando el significado de las proposiciones puede ser representado simbólicamente en un lenguaje de representación de significado, como redes semánticas ó grafos de dependencias conceptuales, no existe un mecanismo de inferencia.

La lógica difusa trata estos problemas de la siguiente manera: el significado de una proposición léxica imprecisa es representado como una acotación elástica sobre una variable y la respuesta a una pregunta se deduce a través de la propagación de restricciones elásticas.

### 2.3.1. Estructura de un Control Difuso.

La estructura de un control difuso es la siguiente, (Figura 2.30).



Figura 2.30 Estructura de un Control Difuso.

### 2.3.2. Módulo de Fusificación.

**Función de normalización** La función normalización efectúa una transformación de escala, la cual mapea los valores de las variables de estado del sistema a un universo normalizado (dominio normalizado). También efectúa un mapeo de los valores normalizados de las variables de salida del sistema a su dominio físico (denormalización de la salida). Cuando se emplea un dominio no normalizado no se requiere de esta función.

**Función de Fusificación.-** La función de fusificación convierte el valor bien definido de una variable de estado del sistema a un valor perteneciente a un conjunto difuso, con la finalidad de hacerlo compatible con la representación de



conjuntos difusos de variables de estado que se emplean en la base de reglas y que constituye parte fundamental del control difuso.

El parámetro de diseño del módulo de fusificación es la elección de la estrategia de fusificación. Este parámetro está determinado por el tipo de máquina de inferencia empleado en la aplicación en particular.

**Base del Conocimiento.**- La base del conocimiento de un controlador difuso basado en el conocimiento (fuzzy knowledge based controller, FKBC) consiste en una base de datos y una base de reglas. La función básica de la base de datos (conocimiento difuso) es proporcionar la información necesaria para el funcionamiento del módulo de fusificación, la base de reglas y el módulo de defusificación. La información de la base de datos incluye a: los conjuntos difusos (funciones de membresía) que representan el significado de los valores lingüísticos de los estados del sistema y las variables de salida del control y los dominios físicos y sus contrapartes normalizadas junto con los factores de normalización y de normalización.

Si los dominios continuos del estado del sistema y las variables de salida del control han sido discretizados entonces la base de datos debe de contener información sobre la política de discretización.

Para el caso en el que prevalezca el caso de continuo, los dominios normalizados de los parámetros de diseño de la base de datos incluyen: la selección de las funciones de membresía, la selección de los factores de escala, la función básica de la base de reglas es representar en un modo estructurado, la política de control de un operador del sistema experimentado y/o un ingeniero de control en forma de un conjunto de reglas tales como: if (estado del proceso) then (salida de control). La parte if de tal regla se conoce como antecedente y es una descripción del estado del sistema en términos de una combinación lógica de proposiciones difusas más sencillas. La parte then de la regla se llama consecuencia y también es una descripción de la salida de control en términos de una combinación lógica

de proposiciones difusas. Estas proposiciones establecen los valores lingüísticos que las variables de salida del control toman siempre que el estado del sistema corresponde (al menos en cierto grado) a la descripción del estado del sistema que se presenta en el antecedente.

### **2.3.3. Módulo de Defusificación.**

Las funciones del módulo de defusificación son: el desarrollo de la llamada defusificación la cual convierte el conjunto de los valores de salida en un valor sencillo, la denormalización de salida la cuál mapea este a su dominio físico, esta función no se requiere si se utilizan dominios no normalizados. El parámetro de diseño del módulo de defusificación es la elección de los operadores de defusificación.

### **2.3.4. Base de Reglas.**

Los parámetros de diseño de una base de reglas incluye: la elección de las variables de estado del sistema, así como las variables de salida del control, la elección del contenido de los antecedentes y consecuencias de las reglas, la elección de los términos de los conjuntos para las variables de estado del sistema y las variables de salida del control, la derivación del conjunto de reglas.

### **2.3.5. Elección de las Variables y Contenidos de las Reglas.**

La unidad fundamental de la representación del conocimiento para la aproximación del razonamiento es la noción de variable lingüística. Zadeh establece:

"Por variable lingüística se quiere significar una variable cuyos valores son palabras ú oraciones en un lenguaje natural o artificial Una vez que se han elegido las variables lingüísticas apropiadas al proceso, se deben establecer el significado

operacional de las reglas if-then. Principalmente hay tres formas de derivar las reglas de un FKBC. Cada una se complementa con la otra y es seguro que una combinación de ellas sea necesaria para construir una aproximación efectiva de la derivación de las reglas.

**Aproximación 1.-** Esta aproximación es la que se utiliza con mayor frecuencia. Y se basa en la derivación de las reglas a partir del conocimiento y experiencia del operador del proceso y/o el ingeniero de control. Esta aproximación se realiza utilizando dos tipos de técnicas:

- 1.- Efectuando una verbalización introspectiva del conocimiento basado en la experiencia.
- 2.- Efectuando una encuesta al operador del proceso y/o el ingeniero de control usando un cuestionario organizado cuidadosamente.

Ambas técnicas proporcionan un prototipo inicial de la base de reglas. Posteriormente será necesario efectuar un ajuste de las funciones de membresía y de las reglas si fuera necesario.

**Aproximación 2.-** Esta aproximación, no esta muy difundida, y utiliza una descripción lingüística considerando un modelo difuso del proceso bajo control para derivar el conjunto de reglas del FKBC.

**Aproximación 3.-** Esta aproximación, tampoco esta muy difundida y considera la existencia de un modelo convencional de un proceso, usualmente un modelo no lineal, y desarrolla una técnica formal para obtener una versión difusa de dicho modelo.

### **2.3.6. Base de Datos.**

Los dos parámetros de diseño que se involucran en la construcción de una base de datos Son: selección de las funciones de membresía y selección de la escala de factorización.

### **2.3.7. Selección de las Funciones de Membresía.**

Para efectos de obtener eficiencia en el uso de los recursos de la computadora, así como para poder efectuar un análisis del desempeño del controlador, se requiere una representación uniforme de las funciones de membresía. Esta se puede obtener utilizando funciones de membresía con formas y definiciones paramétricas uniformes.

La selección más popular de las funciones de membresía incluye funciones trapezoidales, triangulares y en forma de campana. La selección de estas tres funciones se debe a la facilidad con que se pueden obtener la descripción funcional y paramétrica de éstas, además de que en términos de requerimientos en tiempo real hacen uso de un mínimo de memoria y se pueden manipular eficientemente.

### **2.3.8. Máquina de Inferencias.**

Hay dos tipos básicos de vertientes en el diseño de la máquina de inferencia de un FKBC:

1. Inferencia basada en la composición.
2. Inferencia basada en las reglas individuales.

En el primer diseño se obtiene un compuesto de las reglas del sistema, como una relación difusa y sobre esta se valora el antecedente. Como resultado de la composición se obtiene un conjunto difuso que describe el valor difuso de todas las salidas de control. En el segundo diseño, cada regla que se activa se valora individualmente y después se concatenan los aportes individuales en una conclusión final.

El proceso de inferencia generalmente incluye dos pasos:

1. Las premisas de todas las reglas son comparadas con las entradas del controlador a fin de determinar cuáles reglas se aplican a la situación actual. Este proceso de comparación incluye la determinación del grado de certeza con que una regla determinada se aplica y en general, se le da más peso a las recomendaciones de aquellas reglas de las que estamos más seguros que son aplicables a la situación actual.
2. Las conclusiones (o sea, que acción de control tomar) se determinan usando las reglas activas y se caracterizan mediante conjuntos difusos que representan el grado de certeza con el que la entrada al proceso debe tomar determinados valores de salida.

### **2.3.9. Procedimiento de Defusificación.**

Existen varios métodos de defusificación entre los más utilizados tenemos: defusificación por el centro de gravedad de área, defusificación por el centro de las sumas, defusificación por el centro del área mayor, defusificación por el primero de los máximos, defusificación por el promedio de los máximos, defusificación por alturas.

# CAPÍTULO III.

## 3. METODOLOGÍA.

Hemos visto qué es la radiación solar, cómo se altera al atravesar la atmósfera, qué tipos de radiación solar llegan a una superficie y con qué magnitudes se caracteriza la radiación solar. En este apartado vamos a contestar a la pregunta: ¿cuánta energía solar llega a la superficie de un generador fotovoltaico a utilizar?

### 3.1. Radiación solar sobre una superficie.

La radiación solar sobre la superficie terrestre tiene variaciones temporales, siendo unas aleatorias, como la nubosidad, y otras previsibles, como son los cambios estacionales o el día y la noche, provocadas por los movimientos de la Tierra. Para facilitar su estudio, la radiación solar sobre un receptor se clasifica en tres componentes: directa, difusa y reflejada o de albedo (figura 3.1).

- **Radiación directa:** la forman los rayos recibidos directamente del Sol.
- **Radiación difusa:** procedente de toda la bóveda del cielo, excluyendo el disco solar, la forman los rayos dispersados por la atmósfera en dirección al receptor (por ejemplo, en un día completamente nublado toda la radiación recibida es difusa).
- **Radiación reflejada o de albedo:** reflejada por la superficie terrestre hacia el receptor. Depende directamente de la naturaleza de las montañas, lagos, edificios, etc. que rodean al receptor.

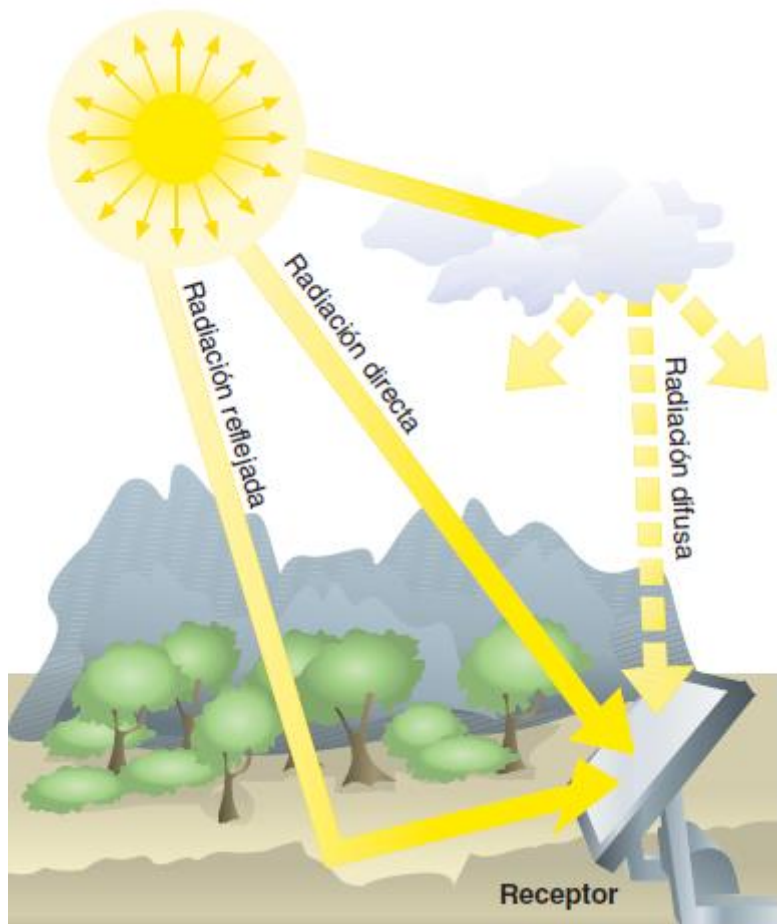


Figura 3.1 Tipos de radiación sobre una superficie.

La suma de todas las radiaciones descritas recibe el nombre de radiación global que es la radiación solar total que recibe la superficie de un receptor y por lo tanto

la que nos interesa conocer y cuantificar.

Para cuantificar la radiación solar se utilizan dos magnitudes que corresponden a la potencia y a la energía de la radiación que llegan a una unidad de superficie, se denominan **irradiancia** e **irradiación** y sus definiciones y unidades son las siguientes:

**Irradiancia:** potencia o radiación incidente por unidad de superficie. Indica la intensidad de la radiación solar. Se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ).

**Irradiación:** integración o suma de las irradiancias en un periodo de tiempo determinado.

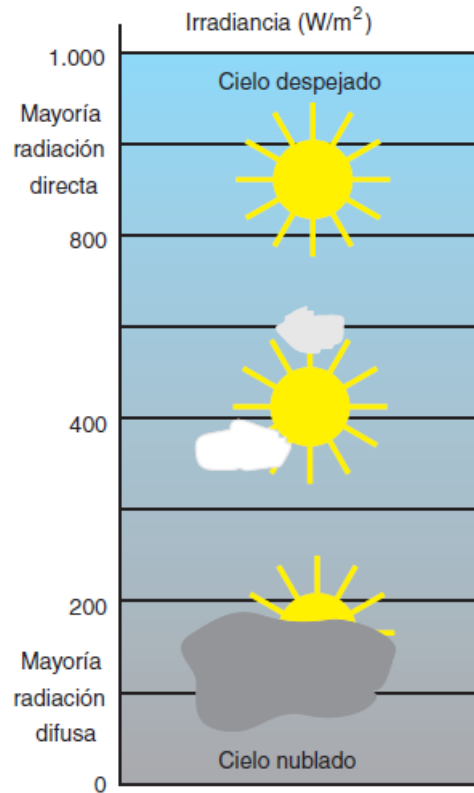
Es la cantidad de energía solar recibida durante un periodo de tiempo. Se mide en julios por metro cuadrado por un periodo de tiempo ( $J/m^2$  por hora, día, semana, mes, año, etc., según el caso). En la práctica, dada la relación con la generación de energía eléctrica, se utiliza como unidad el  $W \cdot h/m^2$  y sus múltiplos más habituales  $kW \cdot h/m^2$  y  $MW \cdot h/m^2$ .

La irradiancia que genera el Sol es de aproximadamente  $6,35 \cdot 10^7 W/m^2$  y solo una pequeña parte de esta radiación llega al exterior de la atmósfera terrestre,  $1.367 W/m^2$  aproximadamente. Este valor de la radiación solar extra-atmosférica recibe el nombre de constante solar ( $B_0$ ) y se recibe cuando la Tierra está situada a una distancia de 1 ua del Sol. La absorción de la atmósfera en condiciones *AMI*, que es el recorrido atmosférico mínimo, reduce la irradiancia que llega a la superficie terrestre a  $1.000 W/m^2$ , valor de irradiancia normalizado que se utiliza para definir los parámetros nominales de los módulos fotovoltaicos.

La figura 3.2 es un ejemplo de valores de irradiancia sobre la superficie terrestre según las componentes directa o difusa de la radiación solar.

Para especificar la radiación global mediante sus correspondientes magnitudes, irradiancia global e irradiación global, se utiliza la letra  $G$ , sin subíndice para la irradiancia global y con uno o dos subíndices para la irradiación global. En la especificación de la irradiación global, el primer subíndice indica el periodo de tiempo de integración de la irradiación: horaria ( $h$ ), diaria ( $d$ ), mensual ( $m$ ) o anual ( $a$ ). El segundo subíndice indica un valor medio de la irradiación: valor medio mensual ( $m$ ) o valor medio anual ( $a$ ).





**Figura 3.2 Escala de irradiancia en función de la composición de la radiación solar.**

Entre paréntesis, después de la letra  $G$ , se especifica la orientación e inclinación de la superficie donde se recibe la radiación solar,  $G(\alpha, \beta)$ , donde  $\alpha$  es el acimut de la superficie y  $\beta$  la inclinación. Si el acimut es cero, solo se indica la inclinación.

Por ejemplo:

- $G(0)$  Irradiancia global sobre una superficie horizontal.
- $G(35, 45)$  Irradiancia global sobre una superficie con acimut  $35^\circ$  (Oeste) e inclinada  $45^\circ$ .
- $G_a(0)$  Irradiación global anual sobre una superficie horizontal.
- $G_h(30)$  Irradiación global horaria sobre una superficie orientada al Sur (acimut cero) e inclinada  $30^\circ$ .
- $G_{dm}(-20, 30)$  Media mensual de irradiación global diaria sobre una superficie con acimut  $20^\circ$  (Este) e inclinada  $30^\circ$ .

Determinar la cantidad de energía solar que llega a una superficie, dado el carácter aleatorio que tiene el clima, es hacer una predicción basada en datos históricos. Podemos conocer cuánta energía solar se ha recibido en el pasado, en un lugar determinado, porque hay bases de datos que almacenan esa información sobre el clima, pero no podemos saber cuánta energía solar se recibirá en el futuro en ese lugar, solo podemos suponer que el comportamiento del clima en el futuro será parecido al del pasado y basándonos en esto, calcular la energía solar que se recibirá. Las bases de datos existentes utilizan registros históricos de varios años con los datos horarios o diarios de irradiancia solar sobre superficie horizontal o inclinada. Los datos se tratan para obtener un modelo de comportamiento anual que recoge, para cada mes, la media de todos los valores de radiación recogidos para ese mes a lo largo de los años. La tabla 3.1 es un ejemplo de datos de radiación solar global medida en la Ciudad de Santiago de Querétaro de julio 2008 a mayo 2010.

Mes	Radiación promedio mensual sobre una superficie horizontal (MJ/m <sup>2</sup> )	Temperatura ambiente, promedio mensual (°C)	Humedad relativa promedio mensual (%)	Velocidad del viento (m/s)
Enero	13,72	15,3	6 1	2,1
Febrero	18,07	16,6	5 1	2,6
Marzo	20,09	19,1	4 7	2,4
Abril	22,07	20,7	4 4	2,4
Mayo	23,80	20,6	5 2	2,8
Junio	20,92	20,9	5 4	2,8
Julio	21,78	20,4	6 3	2,5
Agosto	21,13	19,8	6 9	2,2
Septiembre	19,58	19,8	7 1	2,2
Octubre	19,62	18,9	6 8	2,7
Noviembre	15,37	16,1	6 2	2,2
Diciembre	14,98	14,8	5 5	2,0

Tabla 3.1 Radiación solar global media en Querétaro.

Estado	Ciudad	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Min	Max	Med
Aguascalientes	Aguascalientes	4.5	5.2	5.9	6.6	7.2	6.3	6.1	5.9	5.7	5.1	4.8	4	4	7.2	5.6
Baja California	Mexicali	4.1	4.4	5	5.6	6.6	7.3	7	6.1	6.1	5.5	4.5	3.9	3.9	7.3	5.5
Campeche	Campeche	4.8	5.7	6	5.3	5.4	4.9	4.9	5.3	5.2	5.4	5	4.3	4.4	6	5.2
Chiapas	Tuxtla Gutiérrez	3.8	4.4	4.6	4.8	5.3	5.1	5.4	5.3	4.9	4.4	4.1	3.7	3.7	5.4	4.7
Chihuahua	Chihuahua	5.8	6.4	6.8	6.9	6.9	6.4	6.4	6.5	6.8	6.8	6	5.2	5.3	8.9	5.9
Coahuila	Saltillo	3.8	4.2	4.8	5.1	5.6	5.9	5.9	5.6	5.2	4.4	3.6	3.3	3.3	5.9	4.8
Colima	Colima	4.4	5.1	5.3	5.8	6	5.2	4.9	5	4.6	4.4	4.4	3.9	3.9	6	4.9
D.F.	Tacubaya	5.4	6	6.4	5.9	5.3	5.1	4.5	4.9	4.5	4.8	5.2	5.2	4.5	6.4	5.3
Durango	Durango	4.4	5.4	6.5	7	7.5	6.8	6	5.6	5.7	5.1	4.8	3.9	3.9	7.5	5.7
Guanajuato	Guanajuato	4.4	5.1	6.1	6.3	6.6	6	6	5.9	5.8	5.2	4.8	4.6	4.4	6.6	5.6
Guerrero	Acapulco	4.8	5.3	6.1	5.9	5.6	5.1	5.3	5.4	4.9	5.2	5	4.7	4.7	6.1	5.3
Hidalgo	Pachuca	4.6	5.1	5.6	6.8	6	5.7	5.9	5.8	5.3	4.9	4.6	4.2	4.2	6.8	5.4
Jalisco	Colotlán	4.6	5.7	6.5	7.5	8.2	6.6	5.8	5.6	5.8	5.3	4.9	4.1	4.1	8.2	5.9
Jalisco	Guadalajara	4.6	5.5	6.3	7.4	7.7	5.9	5.3	5.3	5.2	4.9	4.8	4	4	7.7	5.6
Michoacán	Morelia	4.2	4.9	5.5	5.8	5.9	5.2	5	5.1	4.9	4.6	4.3	3.7	3.7	5.9	4.9
Nayarit	Tepic	3.9	4.3	4.8	5.5	6.1	5.3	4.9	5.3	4.4	4.4	4	4.8	3.9	6.1	4.8
Nuevo León	Monterrey	3.2	3.6	4.1	4.3	4.8	5.5	6.1	5.6	5	3.8	3.3	3	3	6.1	4.4
Oaxaca	Oaxaca	4.9	5.7	5.8	5.5	6	5.4	5.9	5.6	5	4.9	4.8	4.4	4.4	6	5.3
Puebla	Puebla	4.9	5.5	6.2	6.4	6.1	5.7	5.8	5.8	5.2	5	4.7	4.4	4.4	6.4	5.5
Querétaro	Querétaro	5	5.7	6.4	6.8	6.9	6.4	6.4	6.4	6.3	5.4	5	4.4	4.4	6.9	5.9
QuintanaRoo	Chetumal	3.9	4.7	5.4	5.7	5.3	4.7	4.9	5	4.5	4.4	4	3.7	3.7	5.7	4.7
San Luis Potosí	San Luis Potosí	4.3	5.3	5.8	6.4	6.3	6.1	6.4	6	5.5	4.7	4.2	3.7	3.7	6.4	5.4
Sinaloa	Culiacán	3.6	4.2	4.8	5.4	6.2	6.2	5.4	5.1	5.2	4.6	4.2	3.4	3.4	6.2	4.9
Sonora	Hermosillo	4	4.6	5.4	6.6	8.3	8.6	6.9	6.6	6.7	6	4.7	3.9	3.9	8.6	6
Tamaulipas	Tampico	3.3	4.1	4.7	6.4	5	4.9	4.9	4.9	4.6	4.6	3.7	3.2	3.2	6.4	4.5
Tlaxcala	Tlaxcala	4.6	5.1	5.5	5.4	5.6	5.2	5.3	5.2	5.1	4.9	4.7	4	4	5.6	5.1
Veracruz	Veracruz	3.7	4.5	4.9	5.1	5.1	4.8	4.7	5.1	4.6	4.8	4.1	3.6	3.6	5.1	4.6
Yucatán	Mérida	3.7	4	4.6	5.2	5.7	5.5	5.7	5.5	5	4.2	3.8	3.4	3.4	5.7	4.7
Zacatecas	Zacatecas	4.9	5.7	6.6	7.5	7.8	6.2	6.2	5.9	5.4	4.8	4.8	4.1	4.1	7.8	5.8

**Tabla 3.2 Insolación global media inclinación a a latitud en México en kWh/m<sup>2</sup>-Día.**

Fuentes: Actualización de los Mapas de Irradiación Global solar en la República Mexicana (R. Almanza S. ,E. Cajigal R., J. Barrientos A. 1997).

Se puede calcular el valor medio anual de la irradiación global diaria sobre una superficie inclinada, con fórmulas sencillas, partiendo de los valores medios anuales de la irradiación global diaria horizontal [ $G_{da}(0)$ ] de la tabla 1.3, utilizando

como datos de partida la latitud de la localidad y la inclinación óptima ( $\beta_{opt}$ ) de la superficie del generador. La irradiación global anual que se obtiene sobre la superficie con inclinación óptima y acimut cero es:

$$G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2} \quad (3.1)$$

$G_a(\beta_{opt})$ : Valor medio anual de la irradiación global sobre superficie con inclinación óptima (kW·h/m<sup>2</sup>)

$G_a(0)$ : Media anual de la irradiación global horizontal (kW · h/m<sup>2</sup>)

$\beta_{opt}$ : Inclinación óptima de la superficie (°)

### 3.1.1. Factor de irradiación (FI).

Siempre que sea posible se debe orientar la superficie del generador de forma óptima ( $\alpha = 0^\circ$  y  $\beta_{opt}$ ). Sin embargo este requisito no siempre se puede cumplir. Pueden condicionar la orientación de la superficie, la integración arquitectónica, la

resistencia al viento, la acumulación de nieve, etc.

Para considerar estas pérdidas, debidas a la inclinación y orientación no óptimas,

se aplica un coeficiente de reducción de la energía denominado factor de irradiación ( $FI$ ) y que se calcula con las expresiones siguientes:

Para ángulos de inclinación:  $15^\circ < \beta \leq 90^\circ$ :

$$FI = 1 - [1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha^2] \quad (3.2)$$

### 3.2. Localización geográfica del estado de Querétaro.

El Estado de Querétaro se ubica en la parte central de la República Mexicana. Cuenta con una superficie total de 11,769 km<sup>2</sup> y su territorio se ubica en dos cuencas hidrológicas; Río Pánuco con 9,316 km<sup>2</sup> la cual vierte al golfo de México y la del río Lerma - Chapala, con 2,453 km<sup>2</sup> que desemboca al Océano Pacífico.

Está dividido en 18 municipios, con una población de 1,546,524 habitantes (según estimaciones de la CEA, a Julio del 2003), cerca del 52 % asentado en la zona conurbada de la ciudad de Querétaro, razón por la cual, Querétaro se encuentra entre los Estados con mayor densidad poblacional por kilómetro cuadrado.

Ubicación:

El Estado de Querétaro se encuentra ubicado en el centro geográfico de la República Mexicana, entre las coordenadas:

20° 01' 16" y 21° 35' 38"      Latitud Norte.

99° 00' 46" y 100° 35' 46"      Longitud Oeste.

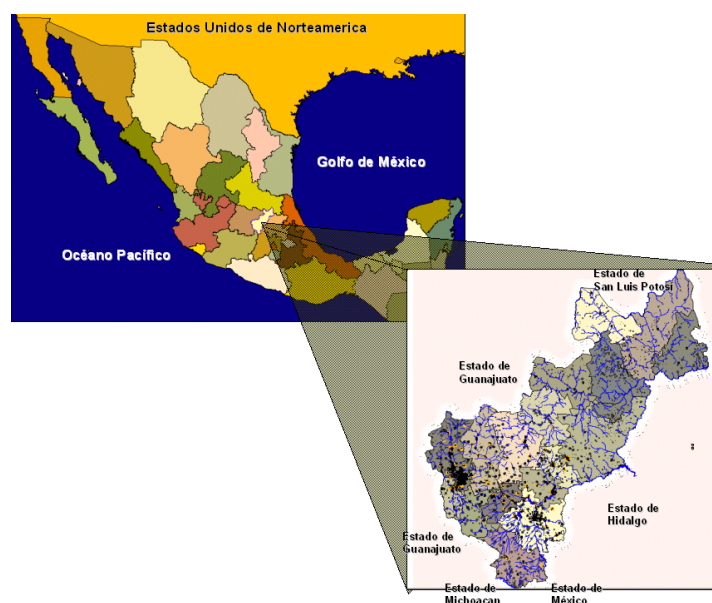


Figura 3.3 Ubicación del estado de Querétaro.

Colindancia:

- Al norte con el Estado de San Luis Potosí.
- Al este con el Estado de Hidalgo.
- Al sur con los Estados de México y Michoacán.
- Al oeste con el Estado de Guanajuato.

Querétaro ocupa el 27 lugar en la República en área con 11,270 Km<sup>2</sup>, el 6% de la superficie del país.

Por el estado cruzan dos sistemas montañosos:

- Al norte la Sierra Madre Oriental (Sierra Gorda).
- Al sur el Eje Neovolcánico (Sierra Queretana).
- Al centro oeste la Mesa del Centro.



Figura 3.4 Estados colindantes con el Estado de Querétaro.

En el estado se encuentran diversos tipos de climas:

Templados subhúmedos del Sur.- Su temperatura media anual oscila entre 12°C y 18°C. Abarca los municipios de Amealco, Huimilpan y Pedro Escobedo.

Secos y semisecos del Centro.- Su temperatura media anual oscila entre 7°C y 25.1°C. Abarca los municipios de Querétaro, Corregidora, El Marqués, Ezequiel Montes, Cadereyta, Tequisquiapan, San Juan del Río, Colón, Peñamiller y Tolimán.

Cálidos y semicálidos del Norte.- Su temperatura media anual oscila entre 14°C y 28°C. Abarca los municipios de Arroyo Seco, Jalpan de Serra, Pinal de Amoles, Landa de Matamoros y San Joaquín.

	Amealco	Cadereyta	Colon	Correg	E. Montes	Huimilpan	Jalpan	P. Escobedo	Qro	S.JR	S. Rosa	Tequis
Ene	17	16	17	17	16	16	15	17	17	17	17	16
Feb	17	19	19	20	19	20	17	20	20	19	20	19
Mar	20	21	22	22	21	22	19	22	22	22	21	20
Abr	21 <sup>o</sup>	23	22	23	24	22	23	24	23	22	22	21
May	23	23	23	23	23	23	22	22	22	21	23	23
Jun	22	22	23	23	22	23	22	22	22	22	23	22
Jul	23	24	22	23	23	22	24	23	23	23	23	22
Ago	22	22	22	23	23	21	22	22	21	22	22	21
Sep	21	22	22	22	22	20	22	21	20	21	21	20
Oct	19	18	19	19	18	19	18	18	18	18	18	18
Nov	17	17	17	17	15	14	15	17	17	17	18	17
Dic	15	15	15	15	14	15	15	15	15	15	15	15

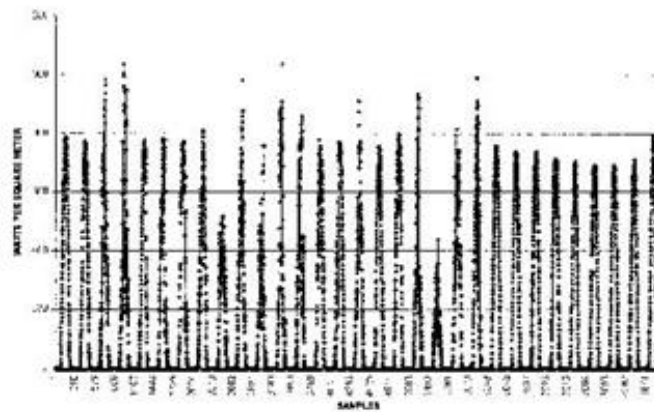
**Tabla 3.3. Radiación global sobre una superficie horizontal en 12 puntos del Estado de Querétaro.**

Amealco Cadereyta, Colon, Corregidora, El Milagro, Ezequiel Montes, Huimilpan, Jalpan, La rochera, Pedro Escobedo, Querétaro, San Juan del Río, Santa Rosa y Tequisquiapan.

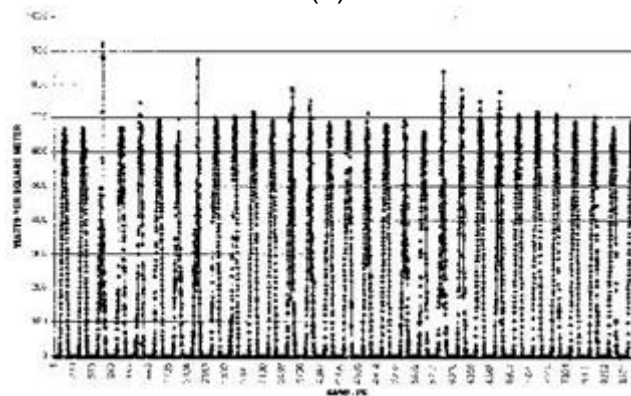
En un periodo anual.

Resumen de la radiación solar global medida en la Ciudad de Santiago de Querétaro de julio 2006 a mayo 2007.

A continuación se muestran los valores de radiación global medidas sobre una superficie horizontal, para la estación ubicada en la Comisión Estatal de Aguas en la avenida 5 de febrero de la ciudad de Querétaro, en el eje de las ordenadas se aprecian los días del mes contabilizando un total de 290.



(a)



(b)

**Fig 3.5 Radiación solar noviembre (a) y diciembre (b) del 2006.**

En las gráficas anteriores se muestran valores constantes para cada mes, encontrándose que los meses en los que la radiación solar alcanza valores por arriba de 900 watts por metro cuadrado son: abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En los demás meses se midieron valores maximales entre 700 y 900 watts por metro cuadrado. Se aprecia que el comportamiento de la radiación global solar es comparable para todos los días de un dado mes salvo los días con mucha nubosidad donde los valores máximos son de 400 a



500 watts por metro cuadrado, con lo que se evidencia la calidad del recurso solar en esta región a través del año.

En el estado de Querétaro, durante el tiempo en que se realizaron las mediciones, de Febrero del 2007 a febrero del 2008, se reciben en promedio 20,4 MJ/m<sup>2</sup> diarios, comparado con otros Estados como Michoacán que recibe en promedio anual 17,7 MJ/m<sup>2</sup> y Guanajuato 19,7 MJ/m<sup>2</sup>. En Querétaro el uso de la energía solar representa una fuente importante de energéticos para el presente y para el futuro. Ésta podría destinarse a calentamiento de agua, secado de granos, cocción de alimentos, refrigeración, aire acondicionado, calefacción, bombeo de agua, generación de energía eléctrica, entre otros.

Las mediciones meteorológicas relacionadas con la energía solar, los datos de radiación medidos directamente, son la mejor fuente de información para elaborar mapas climatológicos de irradiación global, y es común medir ésta en sus componentes directa y difusa, valoradas en unidades de energía por unidad de tiempo, por unidad de área sobre un plano horizontal. Con estas mediciones se pueden dimensionar de forma exacta los sistemas solares.

Contar con datos meteorológicos es de suma importancia, ya que proporcionan información para clasificar los climas de una región y permiten obtener parámetros de diseño para la construcción de viviendas confortables, con un mínimo de consumo de energía. Estudios del clima como el que se presenta en este trabajo, tiene aplicaciones prácticas en el campo del diseño bioclimático de edificaciones, proyecciones agrícolas, pronósticos meteorológicos y estudios de dispersión de contaminantes.

### **3.3. Estudio de disponibilidad del recurso solar en San Juan del Río.**

Datos.-

Ubicación: San Juan del Río Qro.

Latitud  $\phi=20^{\circ} 23' 19,83''$  Norte= $20.3888^{\circ}$  Norte

Longitud  $\lambda=99^{\circ} 59' 46,71''$  Oeste= $99.63^{\circ}$

Altura sobre el nivel del mar= 1978 y 2200 mts

Constante solar  $H_{cs}=1367 \text{ W/m}^2$

Angulo acimutal  $\gamma =$

Reflectividad del suelo  $\rho$  (albedo)=

2.- Calculo de la altura solar máxima y mínima anual ángulos de inclinación:

$$h_{\min} = 90^\circ - (\phi + \delta) =$$

$$Paraw = 0^\circ$$

$$h_{\max} = 90^\circ - (\phi - \delta) =$$

$$S1 = \phi = 20.3888^\circ \text{ Anual}$$

$$S2 = \phi + \frac{\phi}{2} = 30.5832^\circ \text{ Invierno}$$

$$S3 = \phi - \frac{\phi}{2} = 10.1944^\circ \text{ Verano}$$

3.- Establecimiento del día representativo de n y su correspondiente al año juliano

Día 21 de Marzo

$$n=59+i=59+21=80$$

4.- Declinación solar(Ec. De Cooper):

$$\delta = 23.45 \text{sen} \left[ 2\pi \frac{(284 + n)}{365} \right] = -0.4036^\circ$$

5.- Altura solar h: ( $w = 0^\circ$ ) a las 12 horas

$$h_{\max} = 90^\circ - (\phi - \delta) = 69.2075^\circ$$

6.- Angulo horario de salida Y puesta de sol :

$$\delta = -7.044 \times 10^{-3} \text{ Radianes}$$

$$\phi = .3558 \text{ Radianes}$$

$$w_s = \text{ArcCos}(-\tan \phi \tan \delta) = 1.568 \text{ rad} = 89.85^\circ$$

7.-Hora de salid del sol

$$(TSV)_s = \frac{1}{15} \text{ArcCos}(-\tan \phi \tan \delta) = 12 - \frac{1}{15} w_s = 5.99 \text{ Hrs}$$

8.- Hora de insolación=(H.I):

$$H.I = 2 \left[ \frac{w_s}{15} \right] = 11.98 \text{ Hrs.}$$

9.- Angulo horario de salida del sol para los planos con inclinación S1,S2 Y S3

$$\delta = -7.044 \times 10^{-3} \text{ Radianes}$$

$$\phi = .3558 \text{ Radianes}$$

$$S1 = \phi = 20.3888^\circ \text{ Anual} = .3558 \text{ rad}$$

$$S2 = \phi + \frac{\phi}{2} = 30.5832^\circ \text{ Invierno} = .5337 \text{ rad}$$

$$S3 = \phi - \frac{\phi}{2} = 10.1944^\circ \text{ Verano} = .1778 \text{ rad}$$

$$w_{sx} = W = \text{ArcCos}(-\tan(\phi - S) \tan \delta) =$$

$$Ws1 = 1.5707 \text{ rad} = 89.99 \text{ grados}$$

$$Ws2 = 1.5720 \text{ rad} = 90.068 \text{ grados}$$

$$Ws3 = 1.5695 \text{ rad} = 89.92 \text{ grados}$$

Para  $w_s$  se escoge el menor  $w_s$  y  $w$  para cada inclinación.

10.- se introduce los datos de radiación global en el plano horizontal diaria promedio mensual

$$H_{G,H,d} = \frac{MJ}{m^2 \text{ dia}} = 468.680 \text{ W/m}^2 \text{ día}$$

Nota este valor lo obtuve promediando solo los datos de dos meses que fueron Enero y Febrero.

11.- Calculo de la radiación extraterrestre en el plano horizontal

$$H_0 = \frac{MJ}{m^2 \text{ dia}} = 2204.8792 \text{ W/m}^2 \text{ día}$$

Para el día  $n=80$  del año.

12.- Factor de claridad

$$K_t = \frac{H_{G,H,d}}{H_0} = .21256$$

13.- Relación difusa /global (Liu Jordán)

$$\frac{H_{d,H,d}}{H_{G,H,d}} = 1.39 - 4.027K_t + 5.531k_t^2 - 3.108k_t^3 = .7541$$

14.- Relación  $R_b = \frac{H_{b,I,d}}{H_{b,H,d}}$  Para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$w_s^i$  = El valor mínimo de las siguientes expresiones:

a).-  $w_s = \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) =$

b).-  $w = \cos^{-1}(-\tan(\phi - S) \tan\delta)$

15.- Relación  $K_d = \frac{H_{d,I,d}}{H_{d,H,d}} =$  para las tres inclinaciones

$$R_d = \frac{1 + \cos(S)}{2}$$

16.- Relación  $R_p = R_{ref} = \frac{H_{p,c}}{H_{G,H,d}}$  y

$$R_p = \frac{1 - \cos S}{2} \rho$$

17.-Relacion  $R = \frac{H_{G,I,d}}{H_{G,H,d}}$  para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$$R = \frac{H_{d,H,d}}{H_{G,H,d}} R_d + R_p + \left[ 1 - \frac{H_{d,H,d}}{H_{G,H,d}} \right]$$

18.-Calculo de la radiación difusa

$$H_{d,H,d} = H_{G,H,d} \left[ \frac{H_{d,H,d}}{H_{G,H,d}} \right]$$

19.-Calculo de la radiación directa  $H_{b,H,d}$  en el plano horizontal

$$H_{G,H,d} = H_{d,H,d} + H_{b,H,d}$$

20.- Radiación solar directa en el plano  $H_{b,I,d}$  para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$$H_{b,I,d} = H_{b,H,d} R_b$$

21.- Radiación difusa en el plano inclinado  $H_{d,I,d}$  para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$$H_{d,I,d} = H_{d,H,d} R_d$$

22.- Radiación reflejada por el suelo hacia el plano  $H_{\rho,c}$  para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$$H_{\rho,c} = H_{G,H,d} R\rho$$

23.- Radiación global en el plano  $H_{G,I,d}$  para las tres inclinaciones S1,S2 Y S3

$$H_{G,I,d} = H_{b,I,d} + H_{d,I,d} + H_{\rho,c} = H_{G,H,d} R$$

### 3.3.1. Gráficas del estudio de disponibilidad solar en San Juan del Río.

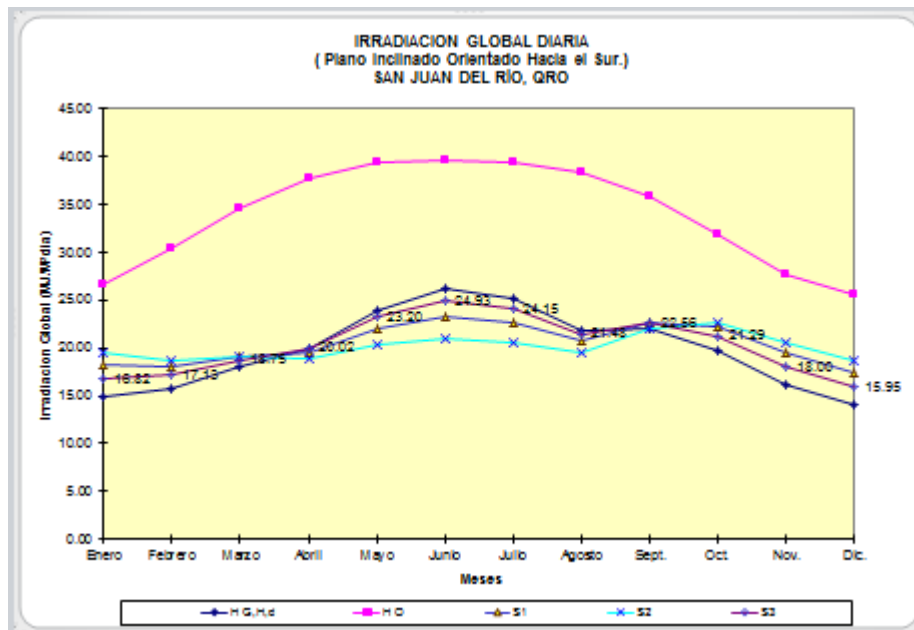


Figura 3.6 Irradiación global diaria en San Juan del Río, Qro.

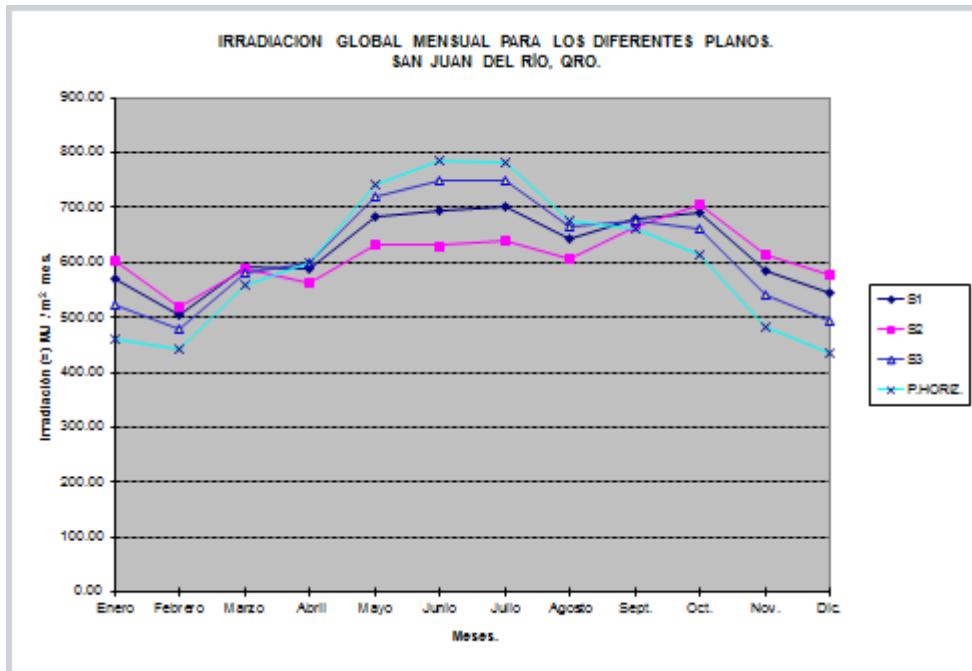


Figura 3.7 Irradiación global mensual en San Juan del Río, Qro.

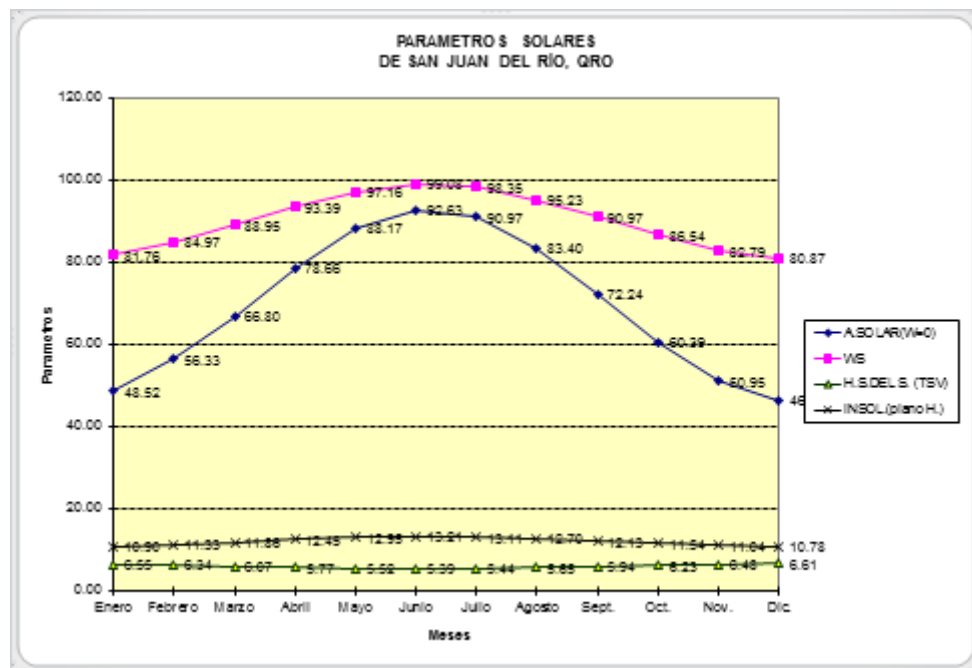


Figura 3.8 Parámetros solares en San Juan del Río, Qro.

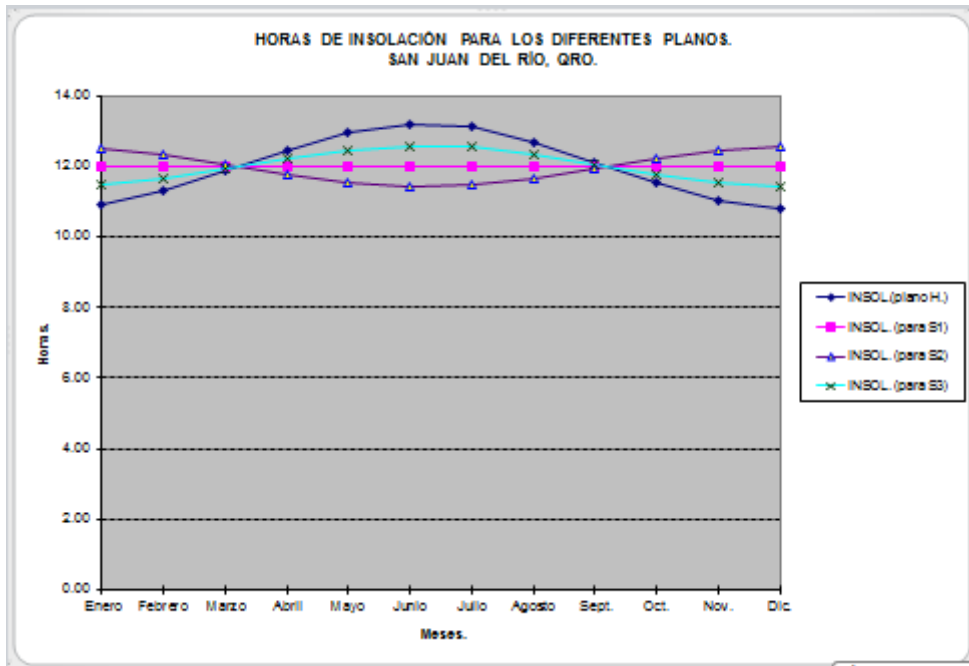


Figura 3.9 Horas de Insolación para los diferentes planos en San Juan del Río, Qro.

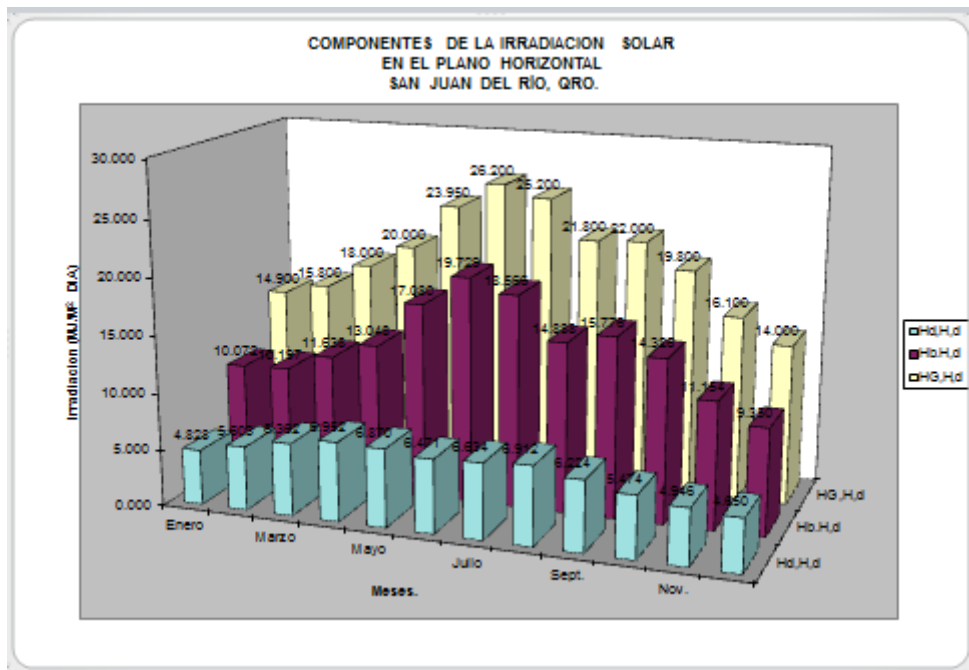
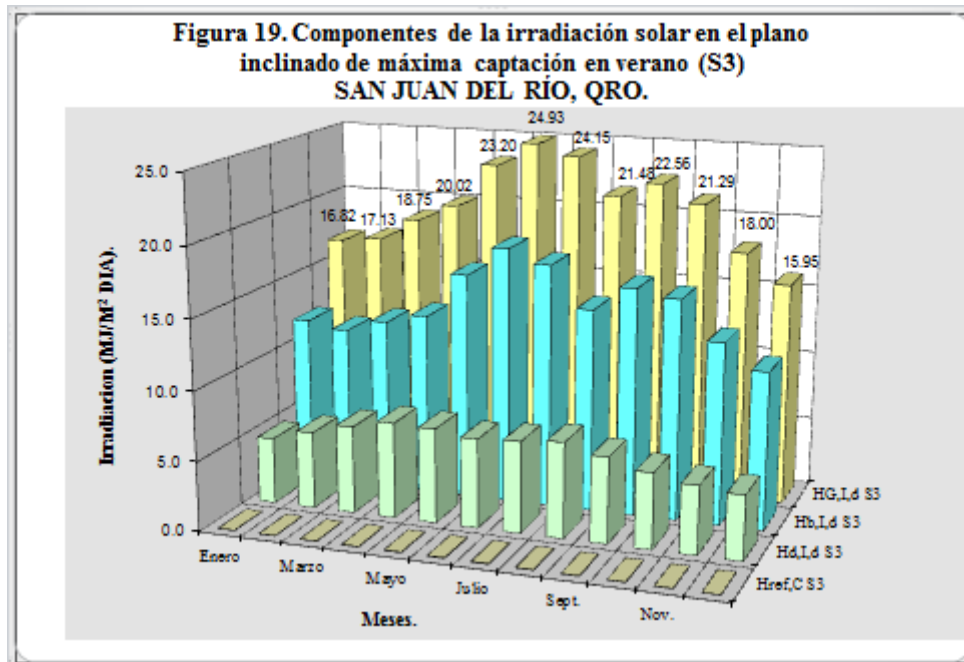


Figura 3.10 Componentes de la irradiación solar en el plano horizontal en San Juan del Río, Qro.



**Figura 3.11 Componentes de la irradiación solar en el plano inclinado en San Juan del Río, Qro.**

### 3.4. Estudio energético del Invernadero Inteligente.

Analizando el estudio energético del Invernadero Inteligente, donde se contempla todos los elementos que integran el sistema, esto incluye motores, bombas lámparas y el mismo sistema de control del invernadero, (La tabla 3.4).

EQUIPO	CANTIDAD	CONSUMO (W)	HORAS DE USO	CONSUMO TOTAL (W.H)
LAMPARAS	5	15	3	225
MOTORES	3	100	0.5	150
BOMBAS	1	745	0.5	375
LAPTOP	1	65	4	260
CONTROL INTELIGENTE	1	120	8	960
<b>TOTAL</b>				<b>1960</b>

**Tabla 3.4 Consumo de los dispositivos principales del invernadero inteligente.**



Para el sistema de riego se consideró básicamente los elementos, actuadores tales como una bomba de  $\frac{3}{4}$  H.P., que se utiliza solo por 30 minutos al día, la cual consume 745 w/h por día.



**Figura 3.34 Sistema de riego.**

Para el Control ambiental, los elementos actuadores que consumen energía del sistema son: dos motores que funcionan para la apertura de ventanas laterales y un motor para la apertura de una ventana cenital, que en combinación controlan el clima ambiental del invernadero, monitoreado por un control del sistema. La potencia requerida por cada motor es de 50 w, donde el sistema requiere de abrir y cerrar al menos 4 veces al día por dos minutos, por lo que el consumo total de los motores es de 160 w/h por día.



**Figura 2.35 Control Ambiental.**

También se consideró una computadora, un controlador lógico programable y sensores para el sistema de monitoreo y control del invernadero, el cual consumen una potencia de 1200 w, que dan un total de 1960 w/h por día. La potencia total requerida del invernadero es de 6000 w/h por día.



**Figura 3.36 Control inteligente.**

Se procede a realizar el cálculo de la corriente requerida del sistema, donde se tiene que:

Carga total diaria ( $C_1$ )	1960 Watts
Tensión en CD del sistema ( $C_2$ )	12 $V_{CD}$
Carga diaria ( $C_3$ )	$C_1/C_2 = 1960 \text{ Wh}/12\text{v} = 163.33 \text{ Amp/h}$
Factor de seguridad por perdida al 20% (1.2)( $C_4$ )	$C_3 * C_4 = 163.33 * 1.2 = 196 \text{ Amp/h}$
Promedio de hora al día ( $C_5$ )	5 horas
Amperaje que el sistema tiene ( $C_6$ )	$C_4/C_5 = 196/5 = 39.2 \text{ Amp}$

De acuerdo a las especificaciones del fabricante de los paneles fotovoltaicos tenemos que:

Amperaje máximo del módulo fotovoltaico ( $P_1$ ) Proveedor	8.52 Amp.
Dividir amperaje del sistema $P_2/P_1$	$39.2 \text{ Amp}/8.52 \text{ Amp} = 4.6 \text{ Paneles}$

Por lo que se necesitaran al menos 5 paneles para este sistema.

Ahora se necesita saber el número de baterías necesarias para el almacenamiento de energía con 3 días de reserva ( $B_2$ ), y tomando como carga diaria  $B_1 = C_4$ .

Por lo que tenemos:

Carga total diaria	$B_1 = C_4 = 196 \text{ Amp/h}$
Días de reserva sin sol	3
Capacidad nominal del banco de baterías ( $B_3$ )	$B_3 = B_1 * B_2 = 196 * 3 = 579 \text{ Amp-h}$
Factor de profundidad de carga de reserva ( $B_4$ ) al 80%	$B_4 = 0.8$
Capacidad corregida del banco de baterías ( $B_5$ )	$B_5 = B_3 / B_4 = 579 \text{ Amp-h} / 0.8 = 723.75 \text{ Amp-h}$
Capacidad nominal de baterías por fabricante ( $B_6$ )	$B_6 = 115 \text{ Amp}$
Número de baterías ( $B_7$ )	$B_7 = B_5 / B_6 = 723.75 / 115 = 6.29$

Por lo que se requiere al menos 7 baterías para tener una reserva de 3 días sin sol.

Con estos resultados se pudo determinar la adquisición de:

8 Panel fotovoltaico policristalino 130W/12V

Características eléctricas:

- Potencia pico: 130Wp.
- Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ ): 21,60V.
- Voltaje en el punto de máxima potencia ( $W_{mp}$ ): 17,2V.
- Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): 8,02A.
- Corriente nominal ( $I_{mpp}$ ): 7,56A.
- Sistema de voltaje Máximo: 715VDC.
- Rendimiento del módulo: 13,2%.
- Tolerancia: +/- 5%.
- Coeficiente de temperatura ( $V_{oc}$ ): -0,36%/°C.
- Coeficiente de temperatura ( $I_{sc}$ ): +0,033%/°C.
- Coeficiente de temperatura ( $P_{max}$ ): -0,44%/°C.

Características físicas:

- Tipo de celdas: Policristalino.
- Dimensiones del módulo: 1483x665x35mm.

- Peso: 12 Kg.
- Número de celdas: 36 (4x9).
- Tamaño de celdas: 156mm.
- Margen de temperatura: -40 a +85°C.

8 Baterías con las siguientes características:

- Marca Cale.
- Especificaciones Voltaje normal 12V.
- Largo 330.2 mm.
- Ancho 172 mm.
- Altura 217.8 mm.
- Altura total 240.3 mm.
- Peso 27.3 Kg.
- Capacidad 115 Ah a 100.
- Tiempo de vida 5 años.
- Instrucciones de carga.
- Voltaje de flotación 13.5 V a 80°F.
- Voltaje de igualación 15.5 V a 80° F.

El inversor seleccionado tiene integrado el controlador del sistema con las siguientes especificaciones:

Aplicaciones

- Energía de respaldo: El Inversor/Cargador TR está diseñado con capacidad de conmutación rápida automática para suministrar de manera continua energía CA, para hogares, casas de campo, y negocios de temporada, en caso de interrupción del suministro eléctrico.
- Sin conexión a la red: Disponible en modelos de 1500, 2400 ó 3600 vatios, los inversores/cargadores DR pueden alimentar a la mayoría de los aparatos eléctricos comunes, tales como lámparas, televisores, cajas registradoras, neveras, lavarropas, computadoras y herramientas eléctricas, permitiéndole disponer de energía en cualquier lugar.

#### Características:

- Selección de ajustes para baterías de plomo ácido tradicionales, de electrolito gelificado y de electrolito absorbido en fibra de vidrio (AGM).
- Circuitos de protección contra bajos niveles de carga, sobretensiones y sobrecargas.
- Conmutación rápida automática (de la red a la batería y viceversa) a la fuente de energía de respaldo.
- Bajo consumo cuando no hay cargas (menos de 1 vatio).
- Interfase (DRI) para configuraciones trifilares de 120/240 VCA y 60 Hz.

#### Especificaciones eléctricas:

- Voltaje de entrada de CA 120 VCA .
- Transferencia bajo tensión CA 40-105 VCA.
- Corriente de entrada de CA 55 A de CA (30 A de CA en uso y 25 A de CA durante la carga).

#### 3.4.1. Costo del sistema Fotovoltaico.

CANTIDAD	CONCEPTO	MONTO
8	PANEL SOLAR ERDM STANDARD 130W (POL) 130SP6	\$14196.00
1	INVERSOR / CARGADOR, 3600W 24V P. BATERÍAS 120 VAC	\$8892.00
1	BATERIA CALE SOLAR 12V, 115 Ah LIBRE MTTO 3-4 VIDA, BATERIA CALE SOLAR 12V 115 Ah, LIBRE MTTO 3-4 VIDA UTIL	\$12096.00
		\$35184.00

El costo total de inversión para el sistema fotovoltaico será de \$35184.00, sin considerar cableado ductos y accesorios necesarios para la instalación. Considerando un costo aproximado de todo este rubro está cercano a los \$2500.00, ya que trata de que el sistema este lo más cercano al cuarto de control del invernadero.

Ahora se analiza el costo de generación de energía a 20 años, que es la vida útil del sistema aproximadamente.

COSTO TOTAL DEL GENERACIÓN	
Watts producidos por el sistema	$(9800w)(365 \text{ días})(20 \text{ años}) = 71540000$ watts
Horas aproximada de aliminación	$71540000 \text{ watts}/13 = 5503076.92 \text{ h.}$
Costo de generación	$35184/5503076.92 = \$ 0.06$

### 3.5. Diseño del seguidor.

El diseño mecánico del seguidor solar se desarrolló considerando las condiciones del lugar de emplazamiento y con componentes que se pudieran adquirir fácilmente, se evitó también la fabricación de componentes mecánicos de difícil manufactura por el aumento del costo que esto significaría en su desarrollo. Al no contar con una normatividad y literatura específica para el diseño de seguidores solares, los requerimientos técnicos fueron obtenidos de simulaciones de funcionamiento del seguidor y los factores de seguridad se tomaron de la norma para diseño de anuncios espectaculares por su similitud con un seguidor solar.

Se buscó el balance de los pesos y áreas con respecto al eje de movimiento para que el momento que se tenga que vencer sea mínimo y el actuador solo ayude a conservar el equilibrio y a provocar el movimiento del seguidor pero que no tenga que soportar el peso completo de los módulos en todo momento.

El control que se escogió se realiza sin retroalimentación de la posición del Sol, utilizando el uso de cálculos astronómicos para evitar sensores y (por especificación directa de requerimiento) para evaluación del funcionamiento de un seguidor solar con este tipo de control.

### 2.5.1 Orientación del panel fotovoltaico.

Una vez descritas las coordenadas que nos permiten situar el Sol en el cielo, hay que situar la superficie del generador fotovoltaico de manera que reciba la mayor cantidad posible de energía solar. Esto depende de:

- La orientación de la superficie del generador fotovoltaico.
- El tiempo que se va a usar a lo largo del año: anual, estacional, etc.
- La aplicación que va a tener: autónomo, conectado a la red, etc.

La orientación de un generador fotovoltaico se define mediante coordenadas angulares, similares a las utilizadas para definir la posición del Sol:

- **Ángulo de acimut ( $\alpha$ ):** ángulo que forma la proyección sobre el plano horizontal de la perpendicular a la superficie del generador y la dirección Sur (figura 3.12). Vale  $0^\circ$  si coincide con la orientación Sur, es positivo hacia el Oeste y negativo hacia el Este. Si coincide con el Este su valor es  $-90^\circ$  y si coincide con el Oeste su valor es  $+90^\circ$ .

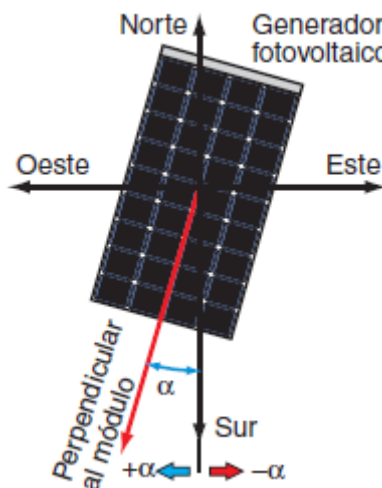


Figura 3.12 Ángulo de acimut ( $\alpha$ ) de un módulo fotovoltaico.

- **Ángulo de inclinación ( $\beta$ ):** ángulo que forma la superficie del generador con el plano horizontal (figura 3.13). Su valor es  $0^\circ$  si el módulo se coloca horizontal y  $90^\circ$  si se coloca vertical.

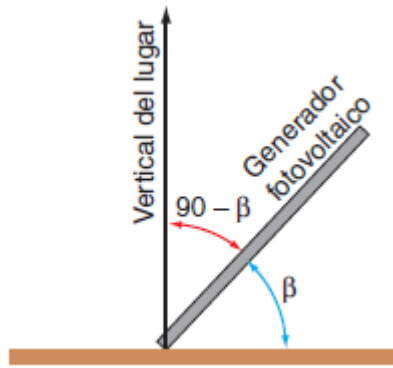


Figura 3.13 Ángulo de inclinación ( $\beta$ ) de un módulo fotovoltaico.

Una superficie recibe la mayor cantidad posible de energía si es perpendicular a la dirección del Sol. Como la posición del Sol varía a lo largo del día, la posición óptima de la superficie también tendrá que ser variable. Veamos cómo es esa variación.

Hemos definido la declinación ( $\delta$ ) como el ángulo variable que forma el ecuador con el plano de la eclíptica. Por lo tanto la dirección de la radiación solar incidente sobre la tierra varía en función de la declinación. La latitud ( $\phi$ ) de un lugar A (figura 3.14) indica el ángulo que forma la vertical de ese lugar con el ecuador.

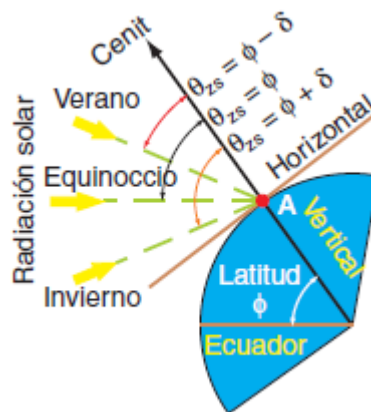


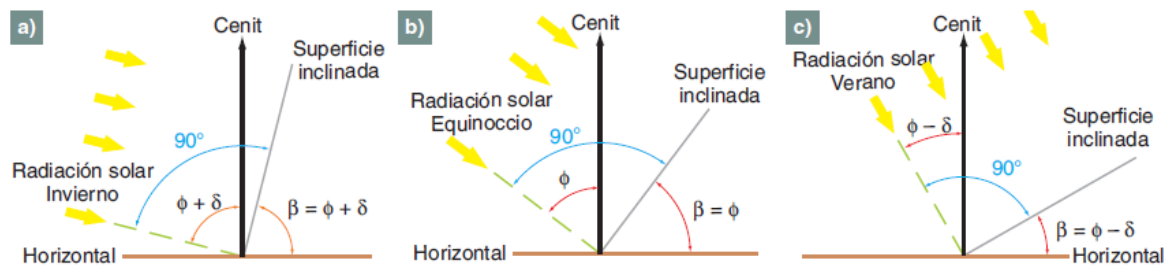
Figura 3.14 Variación anual del ángulo cenital  $\theta_{zs}$  de un lugar A de latitud  $\phi$ .

Por lo tanto, a lo largo del año el ángulo cenital  $\theta_{zs}$  que forma la vertical de un lugar A con la dirección de la radiación solar varía desde  $\theta_{zs} = \phi - \delta$  en el



solsticio de verano a  $\theta_{zs} = \phi + \delta$  en el solsticio de invierno, pasando dos veces por el valor  $\theta_{zs} = \phi$  en los equinoccios del año.

Por lo tanto, para que una superficie reciba la radiación solar perpendicularmente (figura 3.15) tendremos que inclinar la superficie un ángulo  $\beta$  con la horizontal igual al que forma la vertical del lugar con la radiación solar. Tendremos que variar el ángulo de inclinación desde  $\beta = \phi - \delta$  en el solsticio de verano (figura 3.15c) a  $\beta = \phi + \delta$  en el solsticio de invierno (figura 3.15a), pasando por el valor  $\beta = \phi$  en los equinoccios (figura 3.15b).



**Figura 3.15 Superficie normal a la radiación solar. a) Al mediodía del solsticio de invierno. b) Al mediodía de los equinoccios. c) Al mediodía del solsticio de verano.**

### 3.5.2. Selección del seguidor.-

La mejor manera para elegir un tipo de seguidor es analizando su desempeño individual. No se localizaron a nivel bibliográfico datos específicos sobre su rendimiento en campo con lo que se logrará realizar una comparación objetiva, por lo que se recurrió a la simulación para obtener un punto de comparación entre ellos, sabiendo que el rendimiento del panel de acuerdo a una no perpendicularidad con los rayos solares es de aproximadamente el coseno del ángulo entre los rayos solares y la normal al plano de los módulos, ecuación (3.3) (Berbeglia Gerardo, 2003),

$$\eta_f = \eta \cdot \cos(\alpha) \tag{3.3}$$

### 3.5.3. Evaluación de Seguidores solares.

Para evaluar el rendimiento de cada seguidor solar es necesario conocer el vector de trayectoria de los rayos solares y de la normal del plano de los módulos a lo largo del día. El vector de los rayos solares se obtiene en función de los ángulos de altura ( $h$ ) y azimut ( $as$ ) que describen su posición, con ellos se obtienen las coordenadas del punto en el que se encuentra el Sol, y como punto final del vector tenemos el origen, (Figura 3.16).

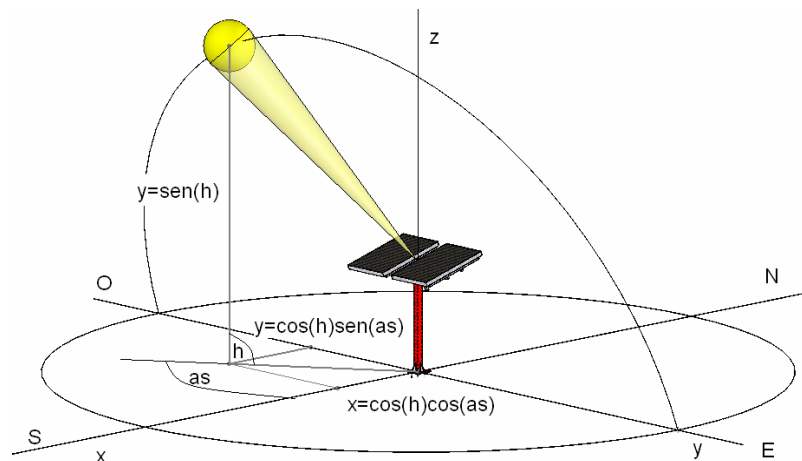


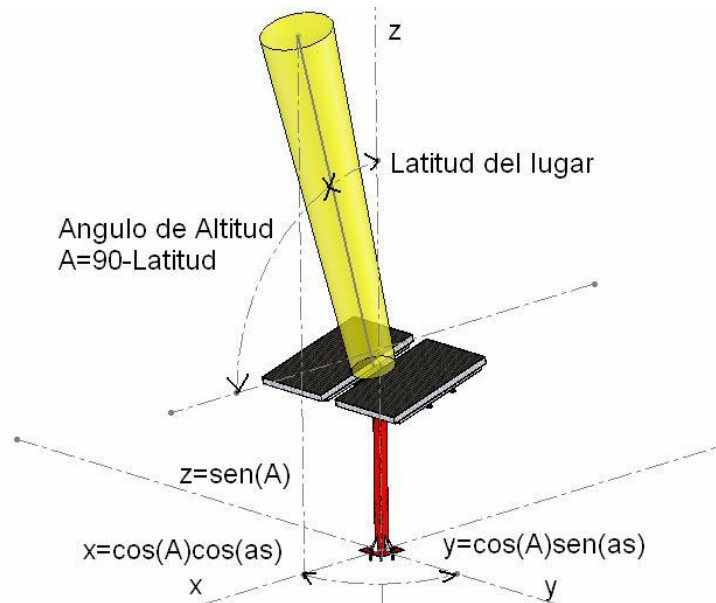
Figura 3.16 Vector de trayectoria del Sol.

Considerando una longitud unitaria se obtiene el vector de trayectoria:

$$\vec{s} = [-\cos(h)\cos(as), -\cos(h)\sen(as), -\sen(h)] \quad (3.4)$$

Para el caso del seguidor solar de dos ejes se supone que la normal del plano siempre es paralela al vector de trayectoria de los rayos solares, por lo que no es necesario calcular este vector, sólo en el caso de los seguidores solares de un eje existe una no perpendicularidad variable a lo largo del día que se tiene que analizar.

Seguidor solar de un eje, azimutal.- El vector normal al plano en un seguidor azimutal tiene un ángulo de altitud ( $A$ ) constante, con un valor de 90 menos la latitud del lugar, el ángulo “x” e “y” se obtienen a partir de la proyección del vector en el plano horizontal, Figura 3.17.



**Figura 3.17.- Vector normal al plano, seguidor azimuthal**

Si se considera que el vector parte del origen hacia el Sol y es de magnitud unitaria, tenemos el siguiente vector normal:

$$\overline{sa} = [\cos(A) \cos(as), \cos(A) \sin(as), \sin(A)] \quad (3.5)$$

Se puede observar que el vector normal es función solo del ángulo de azimut del Sol, por lo que el control electrónico solamente considera este valor para su retroalimentación.

**Seguidor solar de un eje, horizontal.-** En un seguidor horizontal el control está enfocado al seguimiento del ángulo horizontal proyectado en el plano este-oeste, el valor de este ángulo se calcula con la proyección de la trayectoria solar en el plano, el valor de las proyecciones se observa en la Figura 3.18

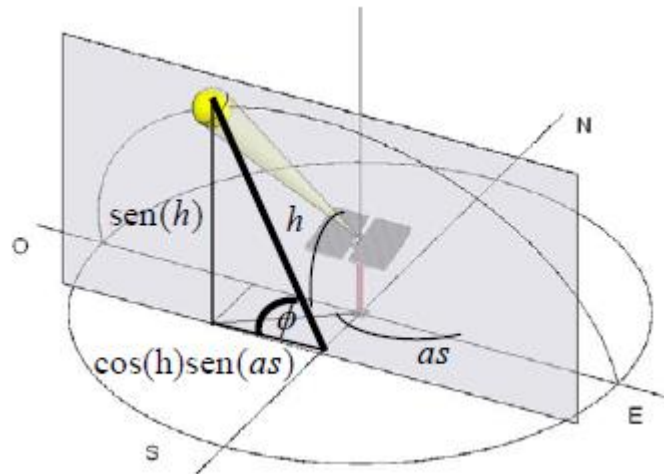


Figura 3.18 Ángulo de control en el seguidor horizontal.

El ángulo de seguimiento ( $\phi$ ) puede entonces ser calculado por trigonometría, obteniendo como resultado:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(h)}{\text{sen}(as)} \right) \quad (3.6)$$

El vector normal en este seguidor presenta la característica de que su valor en el eje "x" es constante durante todo el día e igual a cero, como los módulos no cuentan con ninguna inclinación, el valor de "y" igual al  $\cos(\phi)$  y el valor de "z" al  $\text{sen}(\phi)$ .

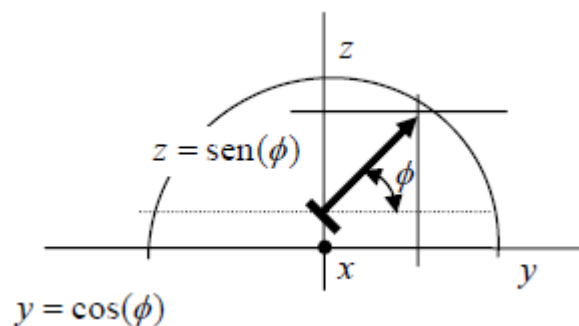


Figura 3.19 Vector normal al Plano, seguidor horizontal

Se analiza la Figura 3.19 para determinar el vector normal en un seguidor horizontal. De esta forma se obtiene el vector normal a la superficie de los módulos para el seguidor solar horizontal.

$$\overline{sh} = [0, \cos(h)\text{sen}(as), \text{sen}(h)] \quad (3.7)$$

**Seguidor solar de un eje, polar.-** El control en un seguidor polar se enfoca al seguimiento del ángulo que se dibuja en el plano de la trayectoria del Sol, el valor de este ángulo se puede determinar de la proyección de la trayectoria en el plano este-oeste, y a partir de ahí realizar un giro en el sistema de coordenadas sobre el eje “y” aplicando las fórmulas para rotación de ejes (Oteyza, 2005), el valor de la coordenada “y” permanece inalterado ya que el giro se realiza sobre el eje “y”, sólo habrá que calcular el nuevo valor de “z”:

$$z' = -y\text{sen}(\theta) + z \cos(\theta) \quad (3.8)$$

Se aplica la ecuación (3.8) al valor de la coordenada “z” en la proyección de la Figura 3.16 y se obtiene el ángulo de trayectoria de un seguidor polar:

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{sen}(h) \cos(\theta)}{\cos(h)\text{sen}(as)} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{\tan(h) \cos(\theta)}{\text{sen}(as)} \right) \quad (3.9)$$

En este caso  $\theta$  es el valor del ángulo de inclinación del seguidor, regularmente igual a la latitud del lugar. El vector normal a la superficie se determina a partir del vector de normal del seguidor horizontal, pero girado sobre el eje “y”  $\theta$  grados, obteniendo:

$$\overline{sp} = [\text{sen}(\phi)\text{sen}(\theta), \cos(\phi), \text{sen}(\phi) \cos(\theta)] \quad (3.9)$$

Para calcular el valor del ángulo de azimut y altura del Sol, se puede determinar el ángulo entre el vector de dirección de los rayos del Sol y el vector normal a los módulos en cada seguidor para conocer el rendimiento de los

seguidores solares y tener un criterio de selección. Se realizó la simulación de generación de energía en los puntos extremos del movimiento de latitud del Sol, equinoccio de otoño y primavera y Solsticio de verano e invierno considerando las características de los módulos utilizados (BP 350) y se obtuvo un promedio de generación de energía por cada mes del año, Figura ). El seguidor solar de un eje considerado fue el polar ya que es el que presenta un mejor rendimiento. El seguidor solar de un eje considerado fue el polar ya que es el que presenta un mejor rendimiento.

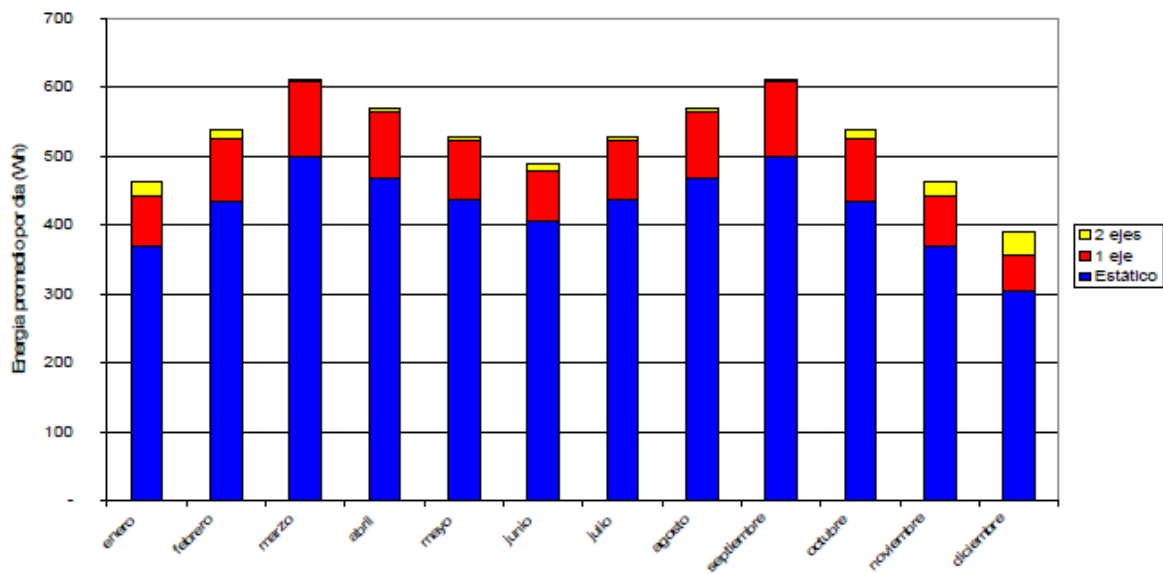


Figura 3.20 Generación de energía mensual con y sin seguidor solar.

#### 3.5.4. Acotación del ángulo de seguimiento del sol.

Idealmente un seguidor solar polar debería recorrer  $180^\circ$  a lo largo de un día, sin embargo este recorrido resulta impracticable debido a que las condiciones orográficas del terreno difícilmente permiten una visualización del plano horizontal completo, además la radiación solar en las primeras y últimas horas del día es reducida y deja de ser conveniente realizar el seguimiento, por lo que se hace necesario realizar una acotación de este ángulo.

Recurriendo nuevamente a la simulación, se reproduce la producción de energía en un día con datos de radiación proporcionados por el Centro de

Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México. Si a partir de las 16 horas se detiene el seguimiento pero se mantiene la última posición del seguidor, el rendimiento disminuye en promedio solo 2%, por lo que se puede concluir que podemos detener el seguimiento a las 16 horas sin afectar de manera considerable la eficiencia del sistema.

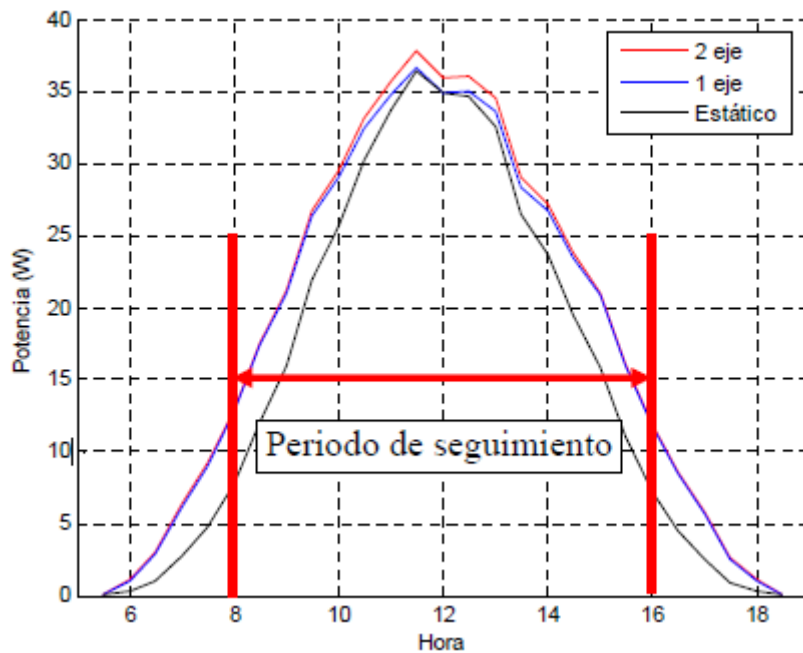


Figura 3.21 Acotación del periodo de seguimiento.

Los resultados se muestran en la Figura 3.21, se observa que la producción a lo largo de un día es parecida a una campana de gauss con el centro en las 12 horas solar, así si se detiene el seguimiento a las 16 horas se debe comenzar a las 8 horas, con lo que se obtiene un periodo de seguimiento de 8 horas.

El Sol se mueve 15 grados cada hora aproximadamente en el plano que contiene su trayectoria, el plano que dibuja la trayectoria del seguidor polar es igual al plano de la trayectoria del Sol, por lo que el seguidor solar se deberá moverse también 15° por hora, por lo que en total durante su periodo de **trabajo** de debe mover 120°, (Figura 3.22).

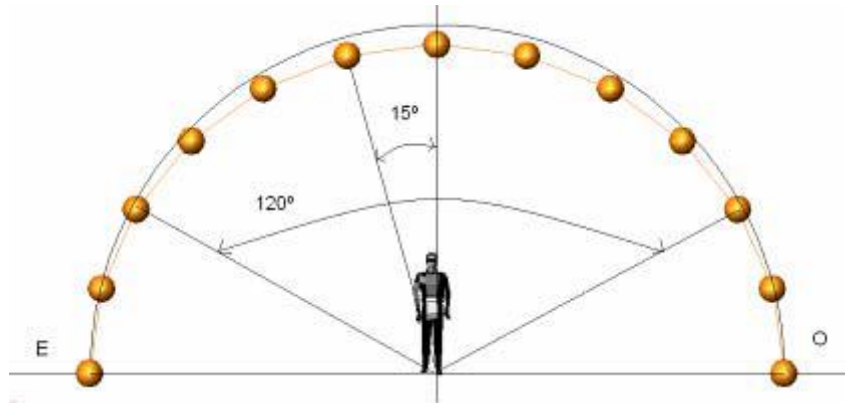


Figura 3.22 Acotación del ángulo de seguimiento

### 3.6. Diseño de la estructura del seguidor.

Teniendo en cuenta el tipo de seguidor que se tenía que realizar, el diseño de la estructura se condicionó por dos factores: la cantidad de módulos que debía soportar y por el tipo de actuador para el movimiento. La estructura se diseñó para soportar dos módulos BP 350 como especificación primaria.

#### 3.6.1. Selección del actuador.

La selección del actuador se basó en el cumplimiento de las siguientes características:

- Funcionamiento con la energía disponible, energía eléctrica de corriente directa proporcionada por el mismo sistema.
- Capacidad para mantener su última posición sin uso de energía.
- Capaz de proporcionar movimientos pequeños sin la incorporación de más elementos mecánicos.
- Adecuado para trabajo a la intemperie.

Con base en estas características y la información obtenida de los seguidores que se ofertan en la actualidad, se optó por el uso de un brazo actuador lineal con transmisión de tornillo sin fin. El modelo utilizado es el HARL3018+ /Super



Jack II+ de la compañía Pro Brand con una longitud de vástago de 18 pulgadas, soporta una carga dinámica de 600 lb y una carga estática de 1000 lb [ProBrand, 2007].



Figura 3.23.- Actuador lineal súper Jack-II del seguidor solar.

Características:

- Longitud: 18"
- Longitud Extendido: 36"
- Máxima Carga Estática: 825 lbs.
- Máxima Capacidad de Carga: 550 lbs.
- Máxima Carga Dinámica: 770 lbs.
- Velocidad: 3.25 mm/s.
- Alimentación: 24 a 36 VDC.
- Consumo Máximo: 12A.
- Ciclo de Trabajo: 20%.

La Figura 3.23 muestra el actuador utilizado y sus principales componentes, este actuador cuenta con un sensor magnético de vástago que proporciona 30 pulsos por cada pulgada de avance lineal, estos pulsos se utilizaron para el sistema de control.

### 3.6.2. Diseño Mecánico.

Se partió de colocar los paneles a cierta altura para poder realizar el movimiento de los ejes, esto se hizo con un poste anclado al piso por medio de unos pernos. En la parte superior del poste se coloca un soporte en forma de “H” que sirve para colocar los paneles fotovoltaicos.



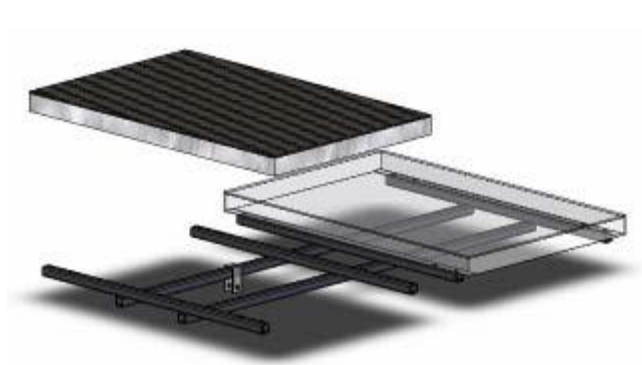
**Figura 3.24.- Base de las celdas.**

Para poder hacer el movimiento del seguimiento solar, se utilizaron bridas por la facilidad de uso y libre movimiento. Esto hace que el motor del actuador lineal tenga un desgaste menor debido a la carga, (Figura 3.35).



**Figura 3.25.- Sistema de movimiento con 4 bridas..**

La Figura 3.26 muestra el diseño del soporte de los módulos, se observa que existe una separación entre ellos que es de donde se soporta y que sirve para proporcionar un área para el paso del aire para evitar que los efectos por la fuerza del viento sean mayores. Se aprecia la forma en que se encuentran unidos, a base de soldadura pero sobrepuestos, lo que ayuda a que la soldadura no trabaje a cortante y así evitar concentración de esfuerzos.



**Figura 3.26.- Colocación de los módulos fotovoltaicos.**

La estructura de los módulos es sujeta a presión por medio de unas barras paralelas sobre los soportes “L”, y el actuador es colocado en el soporte del ángulo de azimut y actúa sobre la estructura de los módulos logrando el movimiento del seguidor alrededor del ángulo de azimut, (Figura 3.27).



**Figura 3.27.- Sujeción de los módulos y del actuador.**

Se concluye con esto el diseño de la estructura del seguidor, las dimensiones de los componentes se obtuvieron por las dimensiones de los módulos y por los esfuerzos en la estructura, siendo las partes más críticas la estructura de soporte de los módulos y el poste del seguidor.

### **3.6.3. Diseño del control del seguidor solar.**

El diseño se basó en el requerimiento de controlar el seguidor sin el uso de sensores externos haciendo uso del cálculo de la posición por medio de la hora y posición del sol con respecto al seguidor. Se determinó que componentes

debería tener el sistema de control para posteriormente llevar a cabo la programación necesaria.

En un inicio, se pensó en utilizar un Controlador Lógico Programable (PLC), por su robustez, sin embargo, analizando el sistema de control con este tipos de dispositivos, se elevaba el costo y teníamos que desarrollar un sistema de monitoreo aparte o diferente al manejado con el fabricante del PLC, (figura 3.28).



**Figura 3.28.- Programador Lógico Programable.**

Por lo que se desarrolló el sistema de control y monitoreo con LabVIEW de National Instruments.

Se determinaron tres componentes principales que debería tener.

- Un módulo compact daq de National Instruments NI cDAC-9174. Que contiene tres tarjetas de adquisición de datos. Una NI-9219, para entrada analógicas, una NI-9263, para salidas analógicas y una NI-9403 que es una tarjeta de entradas y salidas digitales.
- Un amplificador de potencia para el accionamiento del actuador con puente H, para el doble giro del motor del actuador.

- Interfaz gráfica para el monitoreo del sistema.

### 3.6.4. Programación del Control del seguidor Solar.

Se llevó a cabo mediante el diagrama a bloques que proporciona LabView, donde se lleva a cabo la lógica de programación. El programa consta a grandes rasgos de tres ciclos while, un flat sequence, cinco case y un formula de nodo.

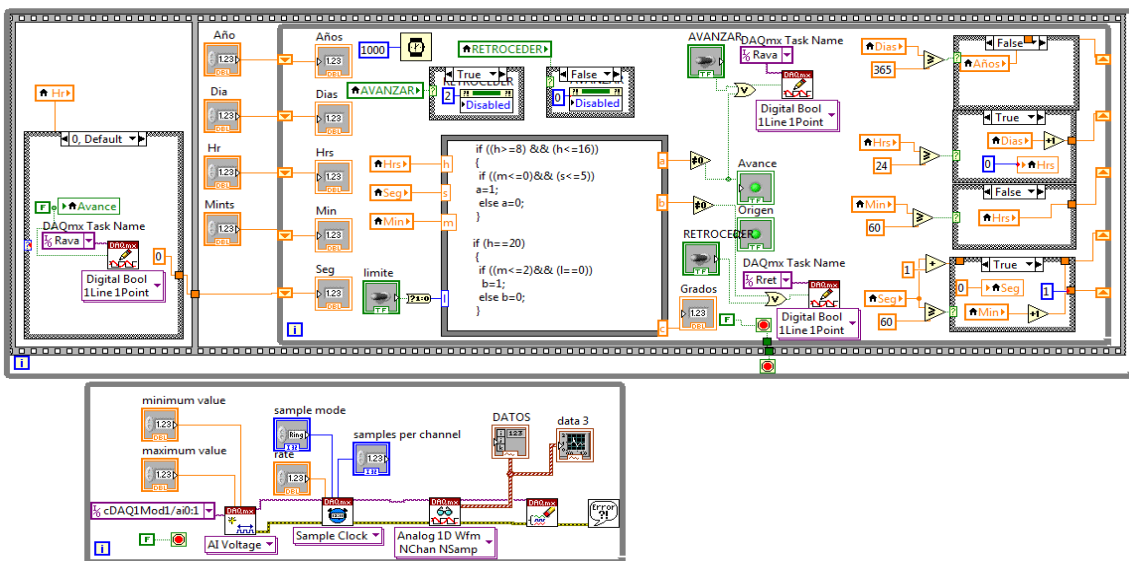
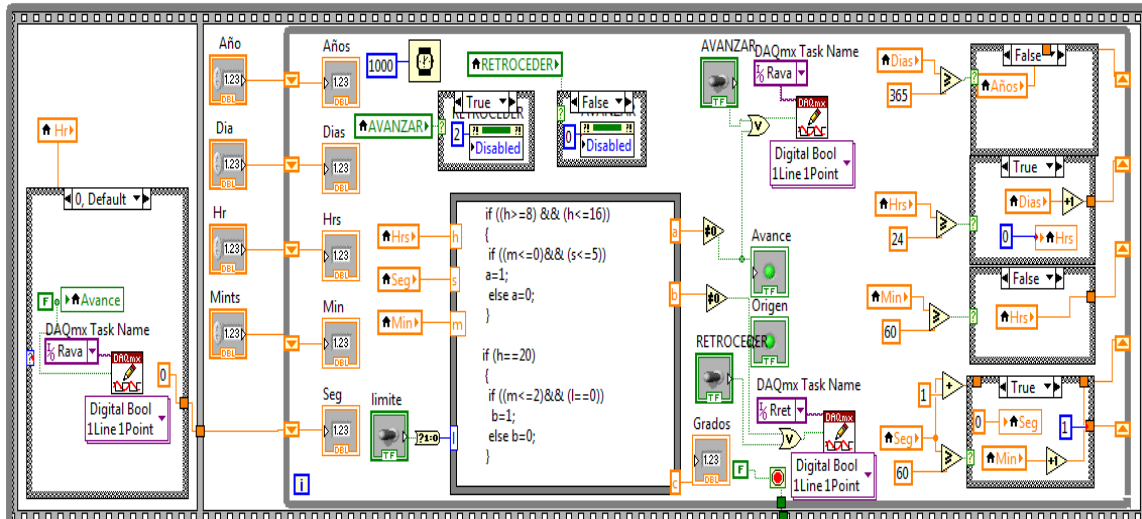


Figura 3.29.- Diagrama a bloques del Control del seguidor solar.

El programa principal esta dentro de un ciclo while, después pasa a un flat sequence de 2 secuencias.



**Figura 3.30.- Ciclo While como parte principal del programa en el diagrama a bloques.**

En la primer secuencia, se lee el dato del control de horas, dependiendo que valor tenga, este se va a un case donde según el valor, nos enviara una señal en alto hacia la DAQ un tiempo determinado. Esto nos sirve ya que el sistema puede ser arrancado en cualquier horario, y la celda se posicionara automáticamente en el lugar donde tenga que ir dependiendo la hora real que sea en el momento.

En el segundo, los datos de los controles de horas, se introducían a un while, donde se lleva a cabo toda la lógica, primero para pasar a realizar un reloj, utilizando los shift register. Y colocando una constante de tiempo de 1 segundo.

También se puede visualizar la fórmula de nodo, donde tiene como entradas los indicadores de tiempo, como salidas tenemos las dos señales de sentido de giro y un indicador de los grados girados. (ANEXO 1)

El código no es tan difícil, de entender, pues se trata solo de comparaciones.

En lo que hay que tener cuidado es en la conversión de datos, pues el nodo de formula no interpreta o da como resultado algunos.

Como parte final se lleva a cabo a la par otro ciclo while que nos permite leer los datos analógicos continuamente con sus respectivas configuraciones previas, ya que lo hace al mismo tiempo para dos canales de la DAQ.

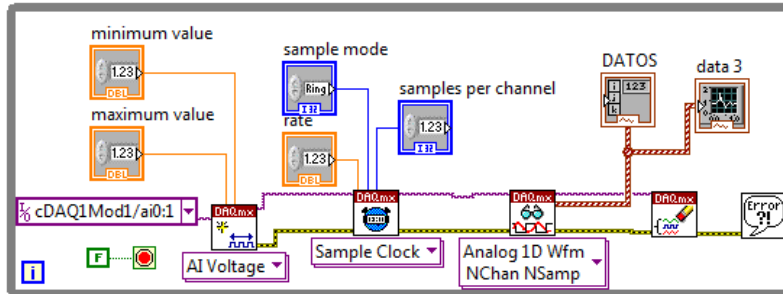


Figura 3.31 Configuración de las entradas desde el diagrama a bloques.

A su vez lleva el proceso de graficarlo y mostrarlo en un indicador, como se muestra en el panel frontal.

En el siguiente escrito se explica el funcionamiento del programa diseñado tanto en el panel frontal como en el diagrama a bloques.

### 3.6.5. Interfaz Gráfica.

Se diseñó una interfaz gráfica para el monitoreo del sistema, en el panel frontal de LabVIEW, donde se configura los parámetros en un apartado inicial (figura 3.32).

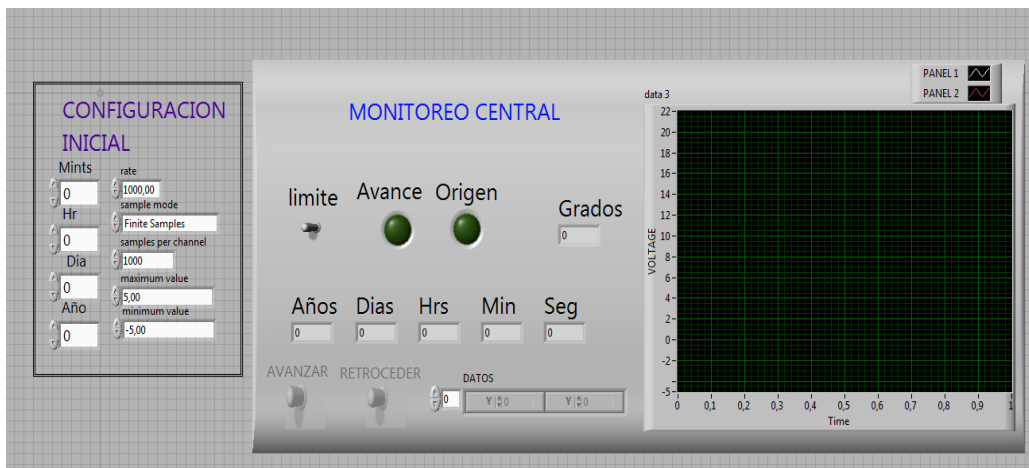


Figura 3.32 Panel frontal del sistema de monitoreo del seguidor.

En esta parte, se lleva a cabo la configuración principal antes de correr el programa. La configuración es con respecto a la velocidad de muestreo, los rangos de las señales analógicas que se están obteniendo.

Por otra parte, en los controles más grandes, se lleva a cabo la configuración de las condiciones iniciales con respecto al tiempo real que se tiene para iniciar el programa. Esta parte NO se tiene que pasar por alto, ya que de ello depende en correcto funcionamiento del programa.

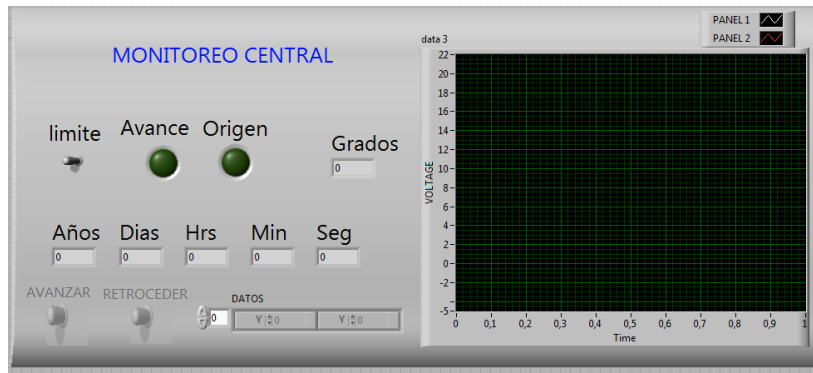


**Figura 3.32 Configuración desde el panel frontal de la interfaz gráfica.**

En esta otra parte, se tiene el cuerpo del panel de control, pues consta de indicadores que nos permiten visualizar el tiempo real y la posición de las fotoceldas. Además de tener integrado 2 botones para hacer manual el movimiento hacia ambos lados de la fotocelda.

Al término de día el sistema automáticamente regresa a su estado inicial, para comenzar al día siguiente con la cara perpendicular al sol durante el inicio del día.

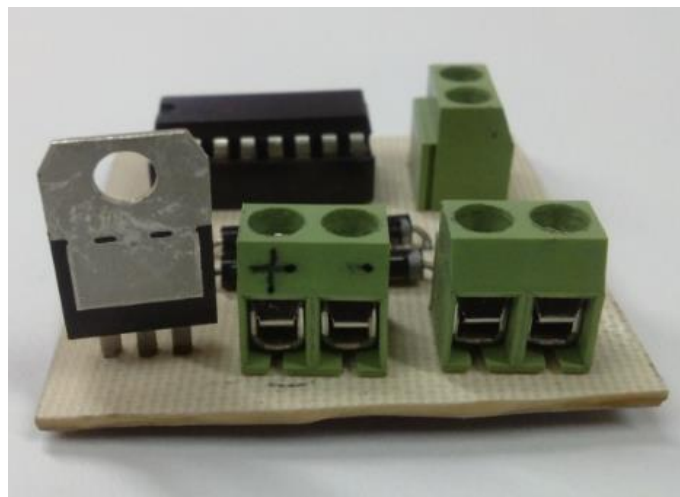




**Figura 3.33 Interfaz gráfica del monitoreo central.**

### 3.6.6. Etapa de potencia.

La etapa de potencia del seguidor fue muy práctica, ya que solo se diseñó un circuito para controlar la velocidad y dirección del motor del actuador lineal, debido a que maneja muy baja corriente, del orden de 400 mA máximo, se pudo utilizar un puente H LM293. Este circuito integrado es uno de los más populares puentes H de estado sólido, puede controlar dos motores de corriente directa y puede entregar hasta 1A por canal, ideal para todo tipo de proyectos de robótica, muy útil y fácil de controlar tiene entradas con nivel TTL y es compatible con cualquier Microcontrolador, incluyendo placas de desarrollo Arduino y tarjetas de Control de Adquisición de datos, como la utilizada en este proyecto, (figura 3.34).



**Figura 3.34 Circuito puente H.**

## **CAPÍTULO IV.**

### **4. RESULTADOS.**

Se logra obtener una potencia eléctrica de 1080 watt, suficiente para alimentar invernaderos inteligentes, que permite el funcionamiento de una bomba de  $\frac{3}{4}$  H.P., iluminación de 6 lámparas ahorradoras de 15 watts y un sistema de control y actuadores con un consumo de corriente de 1 A. Con este trabajo se pudo obtener un diseño industrial de un seguidor solar y un derecho de autor del software de control.

De manera general, el módulo en el seguidor produjo un 18 % más de energía que el módulo que permaneció fijo, esto nos permite decidir que el seguidor solar no es rentable para equipos que generen a bajo de 1 Kw-h de potencia.

Este trabajo se llevó a cabo mediante la colaboración de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río y la Universidad Politécnica de Querétaro, para presentar un Modelo de Utilidad que será llevado a las zonas rurales del estado, donde se pretenden implementar proyectos de sustentabilidad, para mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas regiones.

La interfaz gráfica presentada para el monitoreo y control del seguidor, tiene la ventaja de ser escalable, de tal manera que puede monitorearse y controlar hasta cuatro seguidores solares con hasta tres paneles cada uno.

El sistema fue diseñado en forma modular, teniendo la posibilidad de mejorar el equipo sin hacer cambios en otros módulos, así como la implementación de otros módulos que mejoren el desempeño.

Se presentó este proyecto para Expo-Ciencias Bajío 2012, donde fue premiado para ser presentado en Expo-Ciencias Nacional 2012, en la ciudad de Puebla.

# CAPÍTULO V.

## 5. CONCLUSIONES.

Con la implementación del sistema es posible garantizar el éxito de proyectos productivos para el sector primario. Ya que en zonas rurales donde la línea de alimentación de luz no llega o es muy elevado el costo de transformación y trasportación.

A mayor número de paneles en el sistema los costos de inversión disminuyen. La eficiencia con seguidor solar aumenta la producción de energía hasta un 18%, esto nos garantiza el uso de un panel menos el sistema, que se puede recuperar la inversión en un promedio de 6 meses.

Se diseñó y construyó un prototipo funcional de un sistema fotovoltaico para su aplicación como fuente de energía para Invernadero Inteligentes de un seguidor solar para mejorar su eficiencia.

Se realizó el análisis de los módulos fotovoltaicos para determinar de manera teórica la mejora que se obtendría con un seguidor solar y la cantidad de energía que produciría el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA.

- Berbeglia Gerardo, F. S. (2003). *Simulación de Sistemas de Potencia Solares para satélites*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- Castañeda, R., Ventura-Ramos, E., Peniche-Vera, R., & Herrera-Ruiz G. (2006). Fuzzy Greenhouse Climate Control System based on a Field Programmable Gate Array. *Biosystems Engineering*, 165-177.
- Chavez. (2005). Baterías (SICK, 1996) Inversores.
- Cunningham, R. E. (2003). La energía, historia de sus fuentes y transformación. *Petrotecnia Agosto 2003*, 52-60.
- Dutch, S. I. (2004). *Earth*. Obtenido de World Book Online: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)
- Hollander, J. M. (2003). The Real Environmental Crisis. *University of California Press*, 86-144.
- IEC. (2007). *solar energy*. Obtenido de Iowa Energy Center: <http://www.energy.iastate.edu>
- LEIDLO. (1996). Holland statistics. *Technical report*.
- Luque Antonio, S. H. (2003). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley and Sons.
- Markvart, T. (2000). *Solar Electricity*. John Wiley and Sons.
- Merino, L. (2007.). Energías Renovables. *Energy Management Agency*.
- Oteyza, E. d. (2005). *Geometría Analítica*. Edit. Pearson Education.
- Pérez, J. y. (1998). *Tecnología de invernaderos*. Technical report, FIAPA.
- Plasencia, A. (2001). *Gráfica solar*. Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- PV-TRAC. (2005). *A vision for Photovoltaic Technology*. European Comisión: Report by the Photovoltaic Technology Research Advisory Council.
- Rzayeva, O. S. (2007). Modeling to get hydrogen and oxygen by solar water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 195-205.

Sandia. (2007). *Photovoltaic Systems Research & Development*. Sandia National Laboratories.

VHESC. (2007). "Célula Solar de Muy alto Rendimiento (VHESC)". Universidad de Delaware.

Zomeworks, T. R. (2007). *Passive Energy Products*. Obtenido de [www.zomeworks.com](http://www.zomeworks.com)

## ANEXOS 1.

A continuación se muestra el código que se utiliza.

```
if ((h>=8) && (h<=16))
{
  if ((m<=0)&& (s<=5))
  a=1;
  else a=0;
}

if (h==20)
{
  if ((m<=2)&& (l==0))
  b=1;
  else b=0;
}
{
if (h==8)
  c=0;
else if (h==9)
  c=15;
else if (h==10)
  c=30;
else if (h==11)
  c=45;
else if (h==12)
  c=60;
else if (h==13)
  c=75;
else if (h==14)
  c=90;
else if (h==15)
  c=105;
else if (h==16)
  c=120;

else c=0;

}
```

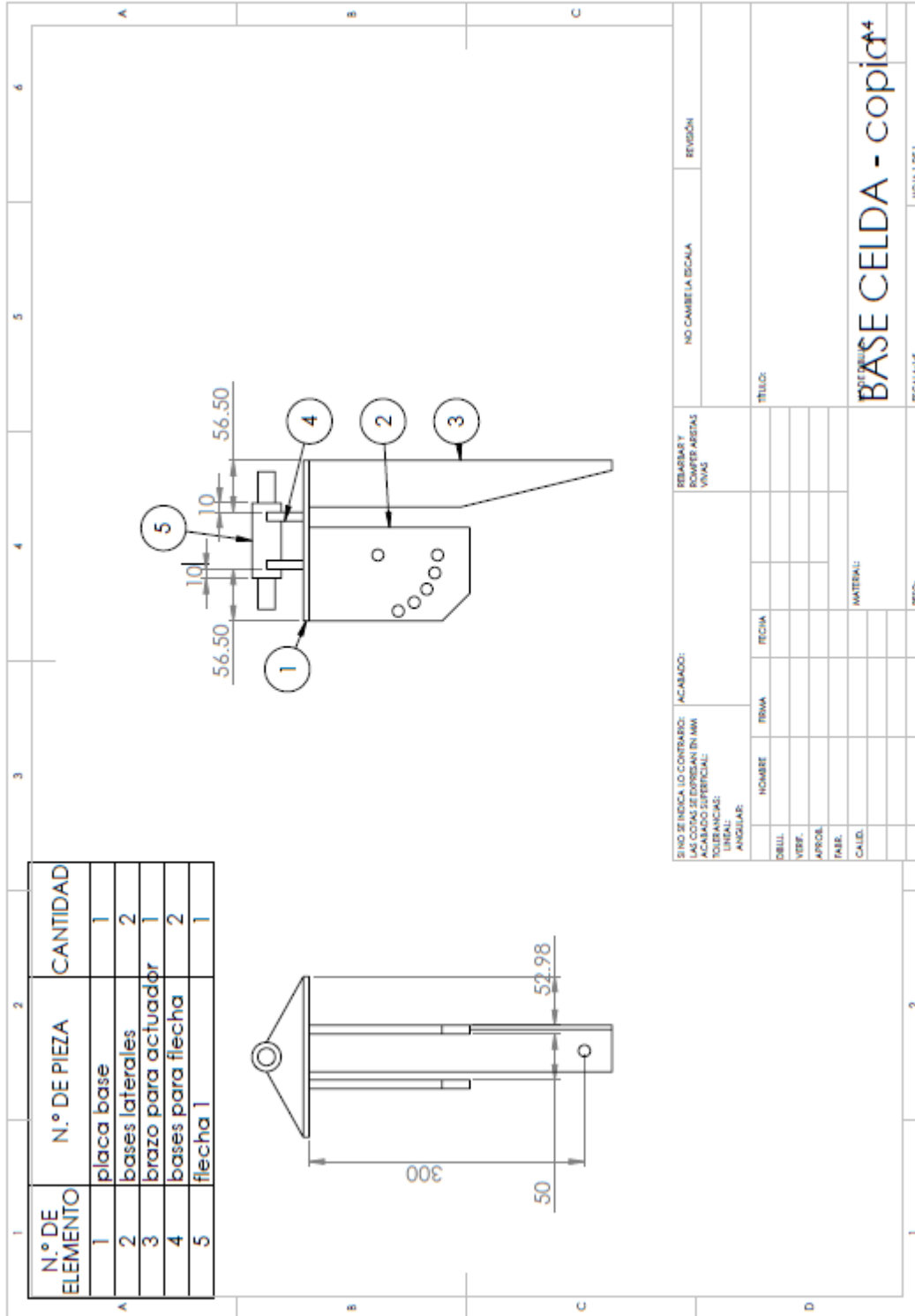
## ANEXO 2.

Participación en la Expo-Ciencias Nacional 2012.

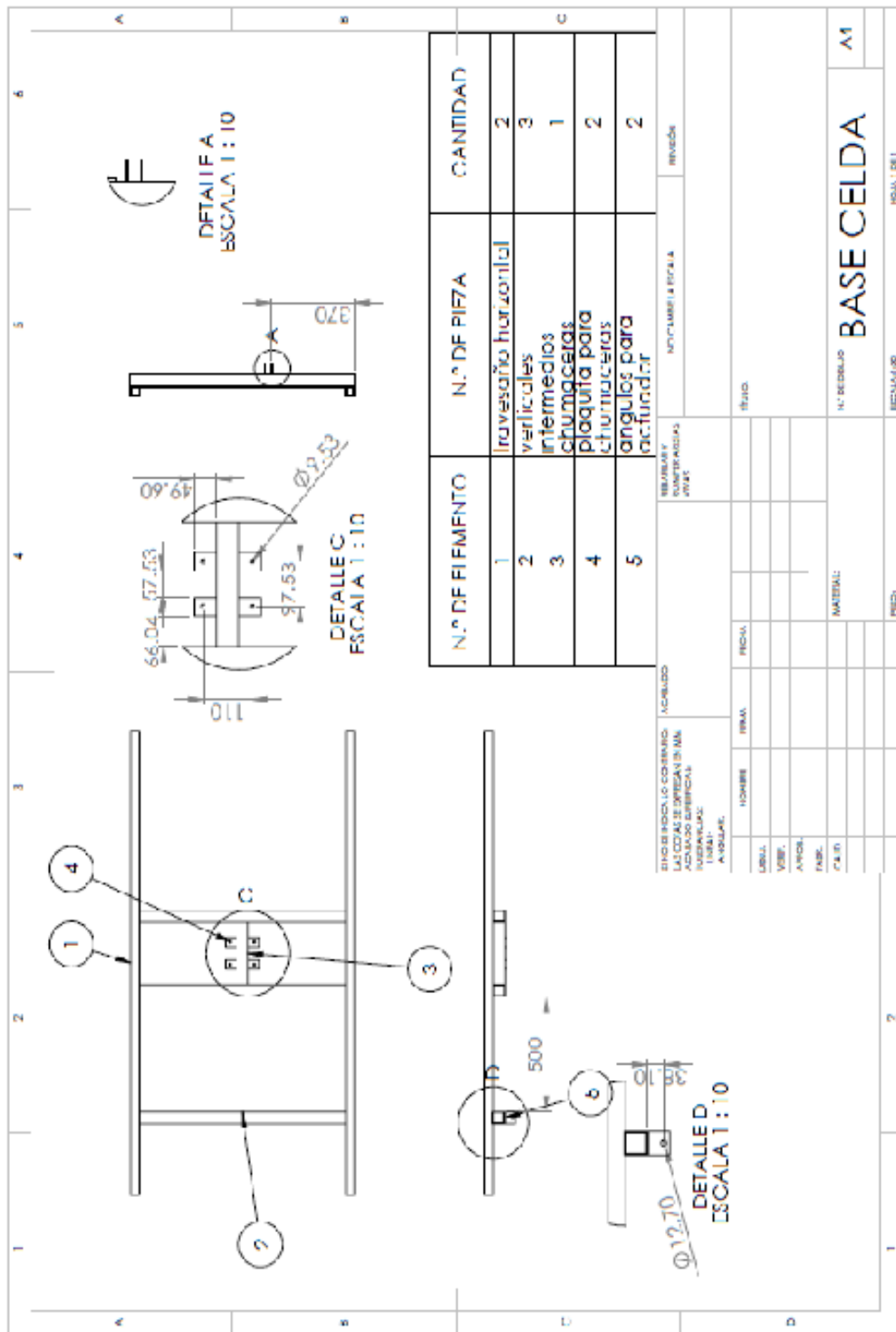


# ANEXO 3.

Planos del diseño del seguidor solar.





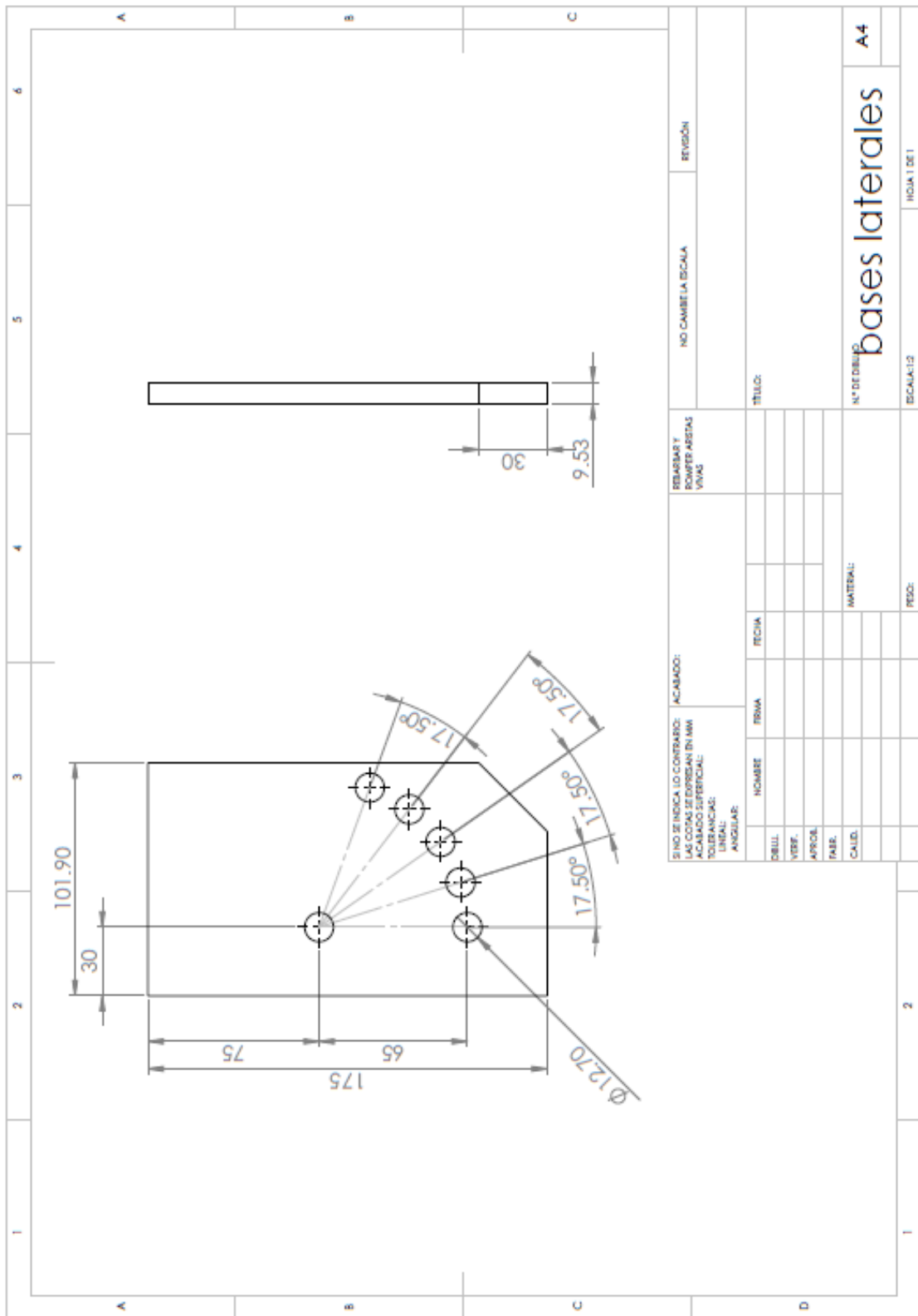


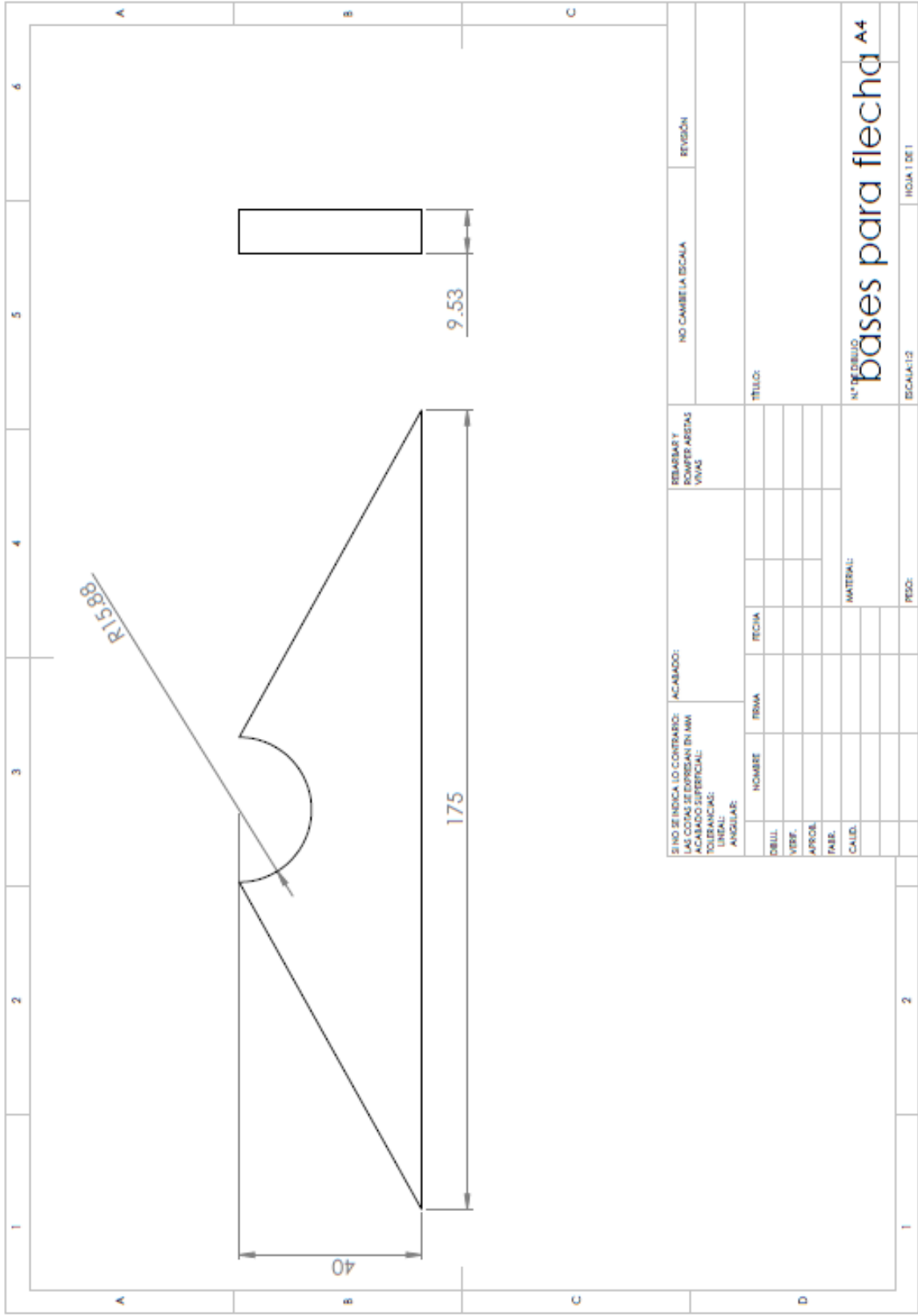
DISEÑO: [ ]  
 DIBUJO: [ ]  
 APROBADO: [ ]  
 TITULO: [ ]  
 LIBRO: [ ]  
 AÑO: [ ]

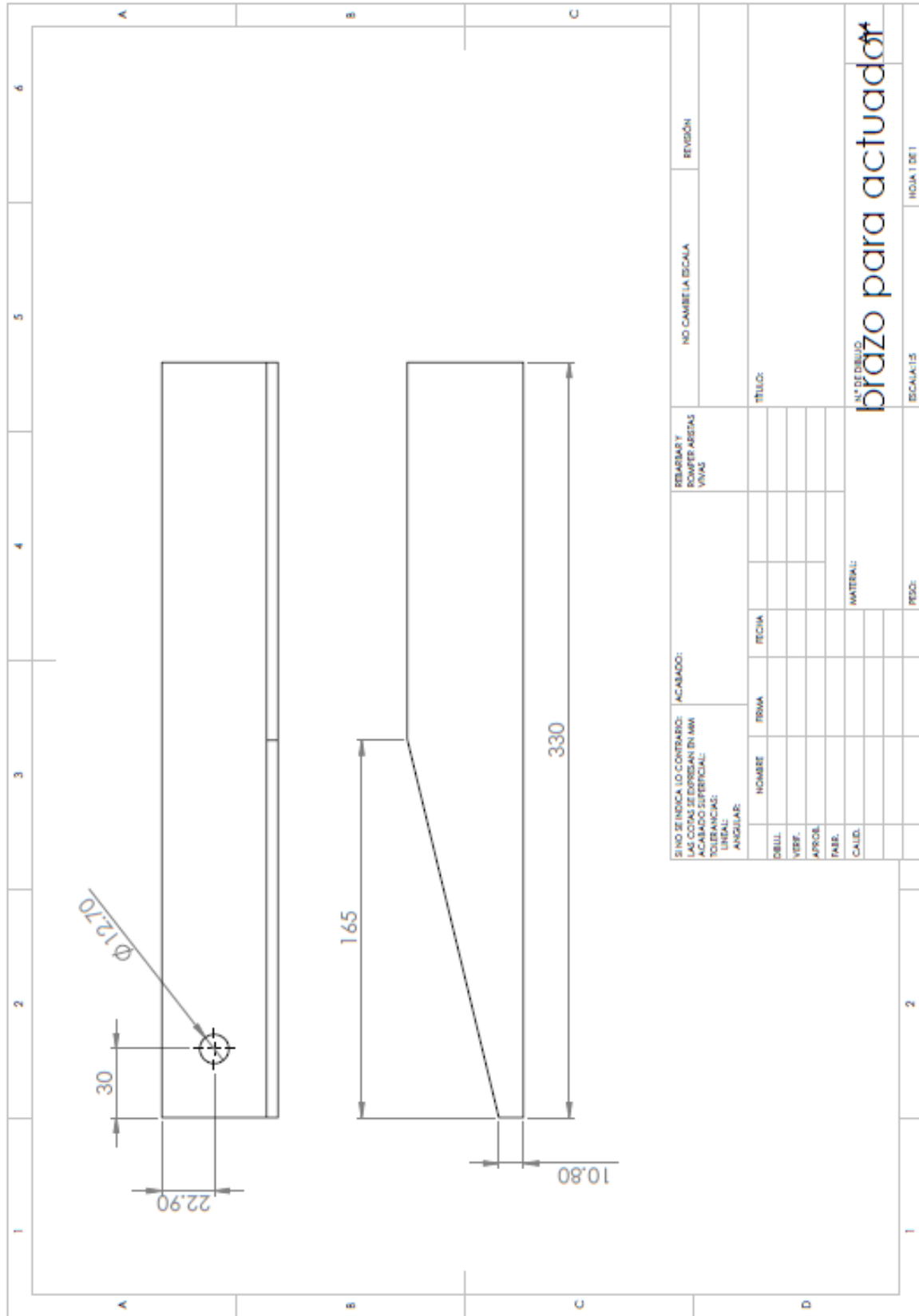
HOMBRE	IRAMA	IRAMA	IRAMA

MATERIAL:  
 [ ]  
 [ ]  
 [ ]  
 [ ]  
 [ ]  
 [ ]

N.º DE BOLSAS  
**BASE CELDA**  
 M







SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPETE ASAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULARES:		HOMBRE		FEMEA		FECHA			
DEBIL.		VERIF.		APROB.		FABR.		CALID.	
MATERIAL:								TÍTULO:	
								Nº DE DIBUJO:	
								brázo para actuador	
1		2		3		4		5	
A		B		C		D		ESCALA: 1:1	
1		2		3		4		5	
A		B		C		D		INDIA 1 DE 1	

